ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

EDNA MARGARITA SARMIENTO GARCÉS
GERSON FABIÁN OVIEDO GALVIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2011

ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

EDNA MARGARITA SARMIENTO GARCÉS
GERSON FABIÁN OVIEDO GALVIS

TESIS DE GRADO EN LA MODALIDAD INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIEROS ELECTRICISTAS

Director:
JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO
Ingeniero Electricista – Magíster en Potencia Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2011





NOTA DE PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE ***EDNA MARGARITA SARMIENTO GARCÉS***		CÓDIGO: 2005557
TITULO DEL PROYECTO ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.		
REGISTRO No 2998	FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS	CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA
CALIFICACIÒN: APROBADO 4,4		CRÈDITOS 8

DIRECTOR DE PROYECTO:

NOMBRE: JULIO CÉSAR CHACÓN	FIRMA:

CALIFICADORES:

HERMÁNN R. VARGAS	GILBERTO CARRILLO C.	FECHA AÑO MES DIA 2011 08 02

NOTA DE PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE ***EDNA MARGARITA SARMIENTO GARCÉS***		CÓDIGO: 2005557
TITULO DEL PROYECTO ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.		
REGISTRO No 2998	FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS	CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA
CALIFICACIÒN: 4,4		CRÈDITOS 8

DIRECTOR DE PROYECTO:

NOMBRE: JULIO CÉSAR CHACÓN	FIRMA:

CALIFICADORES:

HERMÁNN R. VARGAS	GILBERTO CARRILLO C.	FECHA AÑO MES DIA 2011 08 02

Ciudad Universitaria, Carrera 27 - Calle 9
Apartado Aéreo 678 PBX: (7) 6344000
Bucaramanga, Colombia. www.uis.edu.co







NOTA DE PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE ***GERSON FABIÁN OVIEDO GALVIS***			CÓDIGO: 2022342
TITULO DEL PROYECTO ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.			
REGISTRO No 2998	FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS	CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA	
CALIFICACIÒN: APROBADO 4,4			CRÈDITOS 8
DIRECTOR DE PROYECTO:			
NOMBRE: JULIO CÉSAR CHACÓN	FIRMA:		
CALIFICADORES:			
HERMÁNN R. VARGAS	GILBERTO CARRILLO C.		FECHA AÑO MES DIA 2011 08 02



NOTA DE PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE ***GERSON FABIÁN OVIEDO GALVIS***			CÓDIGO: 2022342
TITULO DEL PROYECTO ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.			
REGISTRO No 2998	FACULTAD: INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS	CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA	
CALIFICACIÒN: 4,4			CRÈDITOS 8
DIRECTOR DE PROYECTO:			
NOMBRE: JULIO CÉSAR CHACÓN	FIRMA:		
CALIFICADORES:			
HERMÁNN R. VARGAS	GILBERTO CARRILLO C.		FECHA AÑO MES DIA 2011 08 02

Ciudad Universitaria, Carrera 27 - Calle 9
Apartado Aéreo 678 PBX: (7) 6344000
Bucaramanga, Colombia. www.uis.edu.co



A C UE R D O No. 164 DE 2003
(Diciembre 16)



ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO, TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN O TESIS Y AUTORIZACIÓN DE SU USO A FAVOR DE LA UIS

Yo, EDNA MARGARITA SARMIENTO GARCÉS, mayor de edad, vecino de Bucaramanga, identificado con la Cédula de Ciudadanía No. 63.539.914 de BUCARAMANGA, actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de grado, del trabajo de investigación, o de la tesis denominada(o):

ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (CD o DVD) y autorizo a LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, uso en red, Internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR – ESTUDIANTE, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL AUTOR / ESTUDIANTE, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bucaramanga, a los VEINTISEIS (26) días del mes de AGOSTO de Dos Mil Once (2011).

EL AUTOR / ESTUDIANTE:

EDNA MARGARITA SARMIENTO GARCÉS

A C UE R D O No. 164 DE 2003
(Diciembre 16)



ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO, TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN O TESIS Y AUTORIZACIÓN DE SU USO A FAVOR DE LA UIS

Yo, GERSON FABIÁN OVIEDO GALVIS, mayor de edad, vecino de Bucaramanga, identificado con la Cédula de Ciudadanía No. 1.098.602.851 de BUCARAMANGA, actuando en nombre propio, en mi calidad de autor del trabajo de grado, del trabajo de investigación, o de la tesis denominada(o):

ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (CD o DVD) y autorizo a LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, uso en red, Internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR – ESTUDIANTE, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL AUTOR / ESTUDIANTE, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bucaramanga, a los VEINTISEIS (26) días del mes de AGOSTO de Dos Mil Once (2011).

EL AUTOR / ESTUDIANTE:

Gerson F. Oviedo G.
....

GERSON FABIÁN OVIEDO GALVIS



DEDICATORIA

A Ofelia y Orlando, ejemplo de vida personal y profesional, mis héroes, las personas que más admiro en la vida y apoyo constante quienes nunca han dejado de creer en mí y me han dado todo para querer ser cada día mejor.

A Silvia Carolina, Carlos Orlando y Diana Sofía, han estado siempre a mi lado cada uno a su manera, gracias por ser parte de mi vida, por aconsejarme y siempre desearme éxitos.

A Fabian Oviedo, mi compañero incondicional en la vida y el estudio, durante mi carrera estuviste en todo momento siempre a mi lado dándome fuerza, alegría, sabes que sin ti este logro no hubiera sido posible y es un honor compartirlo contigo.

Los amo con todo mi corazón y les dedico este triunfo, porque es de todos.

MARGARITA

A Dios por darme todo lo necesario para salir adelante.

A mis padres Alban Oviedo y Olga Galvis quienes son la razón más grande para cumplir mis metas.

A mis hermanas que confían y me apoyan incondicionalmente.

A mi hermosa compañera de proyecto de grado Edna Margarita Sarmiento Garcés, por ser la persona que estuvo a mi lado durante toda mi carrera universitaria.

FABIÁN

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Julio César Chacón Velasco por su inmejorable dirección, asesoría y colaboración durante todo el desarrollo de nuestra tesis

A William Estepa por colaborarnos en la culminación de nuestro proyecto.

A los profesores de la Universidad Industrial de Santander que a lo largo de nuestra carrera impartieron sus conocimientos con total agrado y compromiso.

A las familias Sarmiento Garcés y Oviedo Galvis por habernos apoyado durante este proceso.

A Oliverio, Flor de María y Julio que aunque no puedan presenciar la culminación de este éxito espero que estén orgullosos de mi desde el más allá.

A nuestros amigos por sus consejos, motivación y compañía durante todos estos años.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 16

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.. 17

2.1 OBJETIVOS 17
2.1.1 Objetivo general. 17
2.1.2 Objetivos específicos. 17
2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 17
2.3 JUSTIFICACIÓN 18
2.4 ALCANCE 19
2.5 IMPACTO SOCIAL Y VIABILIDAD 19

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 20

4. ELABORACIÓN DEL MANUAL 28

4.1 REVISIÓN DEL ACTUAL “MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN” DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. 28
4.2 REDISEÑO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO QUE LO REQUIERAN. 31
4.3 INTRODUCIÓN DE NUEVAS PRÁCTICAS EN EL MANUAL DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN. 32
4.4 ELABORACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UIS 35

5. PRESENTACIÓN DEL MANUAL 40

5.1 COMPONENTES DEL MANUAL 41
5.1.1 CONTENIDO 41

6. CONCLUSIONES 43

7. BIBLIOGRAFÍA 44

ANEXOS 47



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Generador de impulsos de tensión 21

Figura 2. Unidad de carga del generador de impulsos de tensión........ 22

Figura 3. Divisor capacitivo amortiguado 22

Figura 4. Espinterómetro 23

Figura 5. Consolas de mando del espinterómetro y del generador de impulsos de tensión 24

Figura 6. Transformador elevador de corriente alterna tipo tanque 24

Figura 7. Consola de mando del transformador elevador de tensión alterna 25

Figura 8. Chispómetro 26

Figura 9. Osciloscopio 27

Figura 10. Portada de presentación del actual manual del Laboratorio de Alta Tensión 28

Figura 11. Ejemplo de dos prácticas del actual manual del Laboratorio de Alta Tensión 29

Figura 12. Elementos de protección eléctrica personal........ 33

Figura 13. Sonda para la medición de la intensidad del campo eléctrico en soporte 35

Figura 14. Plano del circuito de control del Laboratorio de Alta Tensión........ 39

Figura 15. Portada del manual actualizado del Laboratorio de Alta Tensión........ 40

Figura 16. Modelo de una práctica del manual actualizado del Laboratorio de Alta Tensión 42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Partes que componen cada una de las prácticas del actual manual del Laboratorio de Alta Tensión **30**

Tabla 2. Partes que componen cada una de las prácticas del manual actualizado del Laboratorio de Alta Tensión **32**

ANEXOS

ANEXO A. Manual del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander **48**

ANEXO B Plano del circuito de control del Laboratorio de Alta Tensión **153**

.

RESUMEN

TÍTULO: **ACTUALIZACIÓN DEL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER***

AUTORES: EDNA MARGARITA SARMIENTO GARCÉS
GERSON FABIAN OVIEDO GALVIS**

PALABRAS CLAVES: Alta tensión, manual, laboratorio.

CONTENIDO:

En el presente documento se presenta el nuevo Manual de Laboratorio de Alta Tensión como una herramienta didáctica que muestra de una manera más clara y ordenada la información necesaria para realizar las prácticas de laboratorio definidas en la asignatura Alta Tensión.

El manual pretende puntualizar el desarrollo de las prácticas de laboratorio por medio de recomendaciones específicas de seguridad, conceptos teóricos básicos, procedimientos claros y completos, y bibliografía necesaria para que los estudiantes puedan profundizar los temas tratados. En él se incluyen dos nuevas prácticas a ser realizadas por los estudiantes y además un procedimiento a ser llevado a cabo en una de las ya existentes, con esto se busca aprovechar al máximo las horas de trabajo designadas al laboratorio de la materia de Alta Tensión que se ofrece como electiva profesional para la carrera de Ingeniería Eléctrica.

También se presenta el esquema de conexiones del Laboratorio de Alta Tensión en un plano que permite una mejor visualización para identificar correctamente como se encuentran interconectados los equipos en el laboratorio y en caso de daño de algún elemento permitir su reemplazo de una forma más rápida y eficiente. Dicho plano además ayudará a los estudiantes en su comprensión del funcionamiento del laboratorio y sus componentes.

---

* Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Julio César Chacón Velasco.

SUMMARY

TITLE: UPDATING OF THE "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN"OF THE UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER *

AUTHORS: EDNA MARGARITA SARMIENTO GARCÉS
GERSON FABIAN OVIEDO GALVIS**

KEYWORDS: High voltage, manual, laboratory, scheme, connections.

ABSTRACT:

In this document is introduced the new Manual de Laboratorio de Alta Tensión as a didactic tool that shows in a clearer and more organized way the necessary information to execute the defined laboratory practices for the High Voltage subject.

The manual aims to clarify the development of the laboratory practices using specific security recommendations, basic theoretical concepts, clear and complete procedures and the necessary bibliography so the students can go deeper on the covered topics. There are two new practices to be performed by the students included on it and also a new procedure was added to an already existing practice, all this seeking to make the most of the working hours designated to the laboratory of the High Voltage subject, which is offered as a professional elective for the Electrical Engineering

It is also introduced the connections scheme of the High Voltage Laboratory on a plan that allows a better visualization to correctly identify how the laboratory equipment are interconnected and in case that any of the elements suffer damage, it makes its replacement easier, quicker and more efficient. The plan will also help the students to understand in a better way how the laboratory and its components work.

* Degree project: Research paper.

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Julio César Chacón Velasco.

1. INTRODUCCIÓN

La asignatura Alta Tensión es una electiva profesional aplicada al programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander, la cual pretende dar a los estudiantes no sólo unas bases teóricas acerca de los fenómenos producidos a grandes niveles de tensión, sino también una parte práctica que permita aplicarlas y entenderlas de un mejor modo. Por esta razón la asignatura brinda al estudiante cada semana un tiempo determinado para realizar ensayos en el laboratorio de Alta Tensión, los cuales van desde estudios de campo eléctrico en líneas de transmisión hasta pruebas de impulso en dispositivos contra sobretensiones.

Este proyecto tuvo como finalidad la actualización del “Manual de laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander”, buscando contar en el laboratorio con una guía más completa y detallada que permita realizar las prácticas bajo condiciones de seguridad y sobre todo con la certeza que al final de cada experiencia los estudiantes obtengan los resultados esperados, siempre y cuando esta herramienta se interprete y aplique de la manera adecuada.

En general, el contenido del manual está dividido en doce prácticas, cada una de ellas enfocada a un determinado tema que hace parte de la teoría vista en clase. El manual contiene una estructura definida e igual para todas las prácticas la cual consta de un titulo, objetivos de la práctica, introducción y/o marco teórico, procedimientos para cada prueba y bibliografía necesaria para que los estudiantes profundicen los temas tratados.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo general.

- Actualizar el manual de prácticas del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander.

2.1.2 Objetivos específicos.

- Rediseñar los procedimientos de las prácticas descritas en el manual de laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander.
- Adicionar los procedimientos para la ejecución de nuevas prácticas a realizar en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander.
- Elaborar los esquemas de conexión de los diversos equipos utilizados en la ejecución de las prácticas en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander.

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día el manual de laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander no cuenta con una explicación actualizada de cada práctica a realizar en el laboratorio, hacen falta procedimientos puntuales y esquemas más detallados que permitan a los estudiantes ejecutar las prácticas de una mejor manera y de acuerdo a lo desarrollado en las experiencias elaborar informes más completos y organizados.

Por otra parte, se pueden plantear nuevas prácticas que ofrezcan un mayor aprovechamiento de los equipos y elementos pertenecientes al laboratorio, y que al mismo tiempo enriquezcan los conocimientos prácticos de los estudiantes.

Además es indispensable tener en cuenta el deterioro de los equipos utilizados en el laboratorio, ya que esto conlleva a que se presenten errores tanto en las mediciones como en el procedimiento normal de la práctica.

2.3 JUSTIFICACIÓN

En la Universidad Industrial de Santander es primordial tener herramientas que apoyen el aprendizaje de los estudiantes cubriendo todos los aspectos de la educación, ya que su misión contempla una formación de alta calidad profesional. Para que lo anterior sea posible, los miembros de la comunidad estudiantil deben contar con espacios y herramientas adecuadas que incentiven su interés por las diferentes asignaturas, y así cuándo éstas requieran de una parte práctica para ser mejor comprendidas, se pueda contar con todo lo necesario para lograr un buen trabajo experimental.

Los laboratorios son espacios donde el estudiante lleva a la realidad la teoría vista en clase y además es una oportunidad para que se relacione con aspectos que le serán de amplia utilidad en su vida profesional; por ello lo ideal es que dichos espacios cuenten con una tecnología que éste al día en los avances de la ciencia tanto en la parte de hardware como software.

A pesar que el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander cuenta con algunos equipos deteriorados por el uso y el tiempo, es de inmensa utilidad para los estudiantes de Ingeniería Eléctrica, pues las actividades que se llevan a cabo en él son primordiales en su formación profesional. Por la anterior razón es necesario hacer una actualización del manual e incluir nuevas prácticas, con el fin de aprovechar al máximo los recursos con que cuenta el laboratorio. También se debe formalizar el manual como una publicación de la Universidad Industrial de Santander para que los esfuerzos de ésta en la formación de profesionales íntegros sean de alguna forma retribuidos.

2.4 ALCANCE

A partir de una revisión detallada del contenido del actual “Manual de laboratorio de Alta Tensión”, junto con un trabajo de investigación, el alcance de éste trabajo de grado comprende el cumplimiento de los objetivos anteriormente expuestos, entregando a los estudiantes una nueva guía de prácticas de laboratorio actualizada y más completa, que permite aplicar la teoría vista en clase por medio de conceptos claves y procedimientos precisos.

2.5 IMPACTO SOCIAL Y VIABILIDAD

Este proyecto favorece el aprendizaje en los estudiantes de Ingeniería Eléctrica en cuanto a la parte práctica de la asignatura Alta Tensión. Los estudiantes contarán con un manual de laboratorio más completo y sobretodo actualizado y entendible, que garantice la calidad de su educación al referirse a estos temas. Los conceptos teóricos que sean requeridos en la práctica serán mejor comprendidos, la implementación real en el laboratorio de los esquemas eléctricos será más confiable y al mismo tiempo más segura, el trabajo en el laboratorio será más práctico tanto para los estudiantes como para el profesor; todo esto con el fin de tener una herramienta de clase más agradable y poder apoyar en ella las actividades a realizar en el laboratorio.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La elaboración de manuales de prácticas de laboratorio es una herramienta que se utiliza en la docencia con el fin de facilitar al estudiante el desarrollo de competencias relacionadas con el saber-hacer y en los cuales los docentes recurren a su experiencia para la selección de las prácticas adecuadas para sus aprendices. Sin embargo, la estructura poco flexible de algunos de estos manuales, no les permite en ocasiones profundizar en los temas que para ellos resulte de interés.

Ante esta situación y con la preocupación inicial surgida, acerca de actualizar las prácticas de laboratorio para los estudiantes de Ingeniería Eléctrica; seguida de la necesidad de elaborar un texto que además de recoger las prácticas adecuadas con las ilustraciones apropiadas para el aprendizaje, dé los conceptos básicos sobre Alta Tensión, nace la actualización del manual del Laboratorio de Alta Tensión. Este debe incentivar y permitir al estudiante seguir explorando en cada uno de los temas que en él se incluyen; de forma tal que el alumno tenga la opción de escoger, dentro de su nivel de formación, el grado de profundización en dichas temáticas.

Es por esto, que el objetivo fundamental con el presente proyecto de grado es proporcionar a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica, un documento actualizado y práctico que contribuya con el desarrollo de habilidades y destrezas que le permitan complementar sus estudios sobre Alta Tensión. De esta forma, el estudiante no solo adquiere las competencias necesarias para desempeñarse en sus estudios, sino que además aprende de forma correcta estrategias de búsqueda de información técnica para profundizar e investigar durante su proceso de formación y en el curso de su vida profesional.

Actualmente el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander cuenta con los siguientes equipos disponibles para realizar las pruebas:

- Generador de Impulsos de Tensión.

Con este generador se pueden implementar pruebas donde se requiera el uso de las ondas normalizadas 1,2/50 µs y 250/2500 µs. En las figuras 1, 2, 3, 4 y 7 se aprecian sus componentes principales.

Figura 1. Generador de impulsos de tensión



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

Marca Haefely tipo S-serie 8 etapas
Máxima energía por etapa: 2,5 kJ
Capacidad por etapa: 500 nF
Tensión máxima por etapa: 100 kV
Eficiencia para IA: 86-97 %
Eficiencia para IM: 83-90 %

Figura 2. Unidad de carga del generador de impulsos de tensión



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 3. Divisor capacitivo amortiguado



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.



Marca Haefely

Tensión Máxima IA: 1 200 kV

Tensión Máxima IM: 1 000 kV

Relación: 720,5/1

Figura 4. Espinterómetro



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

Marca Haefely

Diámetro de esferas 25 cm.



Figura 5. Consolas de mando del espinterómetro y del generador de impulsos de tensión.



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

- Transformador elevador te tensión alterna.

  Esta unidad permite la implementación de pruebas donde se soliciten señales de C.A (60 Hz). Las figuras 6 y 7 muestran su estructura general.

Figura 6. Transformador elevador de corriente alterna tipo tanque



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

Marca Foster

Tensión primaria: 0-500 V

Tensión secundaria: 0-300 kV

Potencia: 20 kVA

Corriente primaria máxima: 40 A

Corriente secundaria máxima: 67 mA

Incluye divisor de tensión óhmico de relación calibrada 1055/1

Figura 7. Consola de mando del transformador elevador de tensión alterna



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

- Chispómetro

  Equipo diseñado para la ejecución de pruebas sobre acites dieléctricos. En la figuras 8 se muestra el chispómetro.



Figura 8. Chispómetro



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

Marca Siemens

Tensión primario: 0-216 V

Tensión secundario: 0-60 Kv

Voltímetro analógico

En la figura 9 se muestra el osciloscopio que se utiliza en el Laboratorio de Alta Tensión.

Figura 9. Osciloscopio



Fuente: Vargas Edgar. "Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva". Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

Se espera con este proyecto poder aprovechar mucho más estos equipos con los que cuenta el laboratorio. También se pretende realizar un aporte importante para la docencia e investigación no solo en los programas de Ingeniería Eléctrica, sino en toda la Universidad Industrial de Santander.

4. ELABORACIÓN DEL MANUAL

La realización del manual se llevó a cabo mediante cinco pasos, los cuales contienen tareas y actividades que permiten ir secuencialmente cumpliendo con los objetivos específicos y finalmente con la culminación del proyecto.

4.1 REVISIÓN DEL ACTUAL "MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Se realizó un análisis detallado al actual manual de laboratorio de Alta Tensión enfocado a la forma en cómo estaban planteadas las prácticas y a la presentación del mismo en general.

Figura 10. Portada de presentación del actual "Manual de laboratorio de Alta Tensión".

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES

MANUAL DE LABORATORIO DE
ALTA TENSIÓN

Por:
Julio Rugeles J., Msc
Julio César Chacón V., MPE

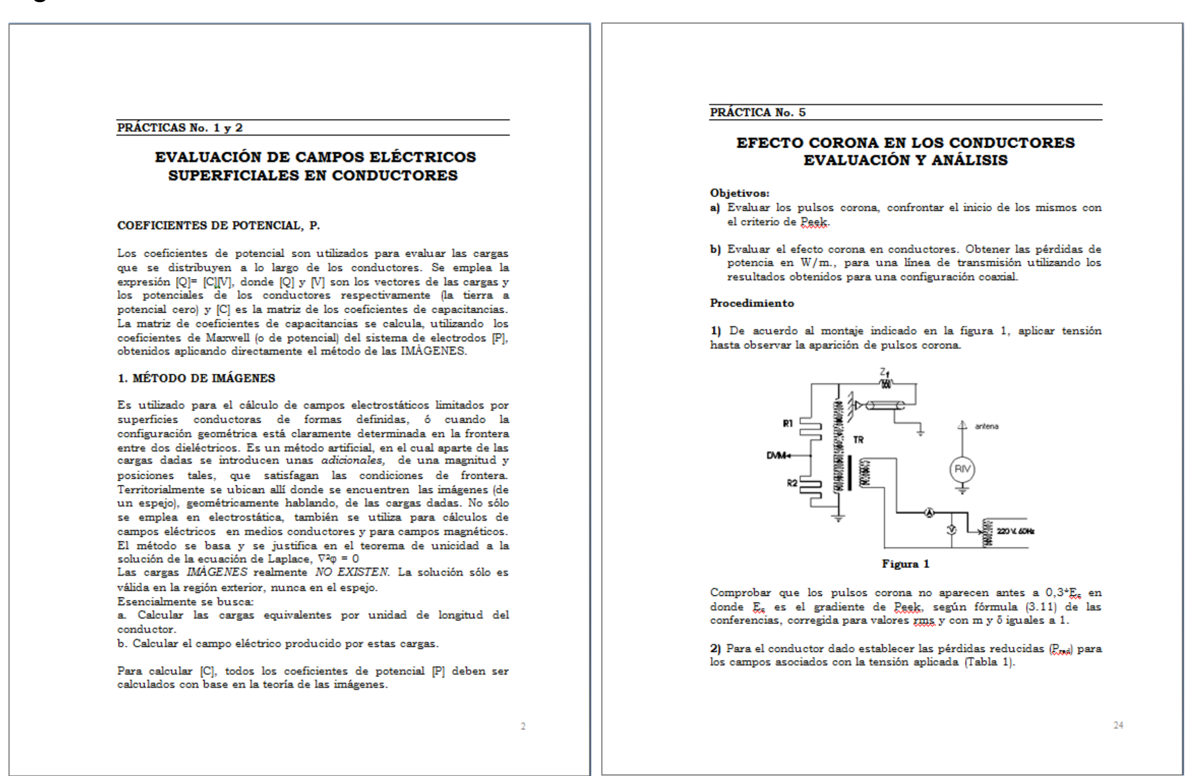
Bucaramanga, Febrero de 2006

Fuente: Rugeles J., Chacón J. C. "*MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN*". 2006.

Como resultado se propuso anexar al manual las partes básicas que debe tener un libro de texto, como lo son la portada, contraportada, tabla de contenido e introducción (estas partes se muestran en el Capítulo 4. Presentación del manual).

Teniendo en cuenta los riesgos que se corren al realizar cada práctica en el laboratorio es de suma importancia presentar en el manual las normas de seguridad requeridas para trabajar en los laboratorios de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Figura 11. Ejemplo de dos prácticas presentes en el actual manual de laboratorio organizadas de manera diferente.



PRÁCTICAS No. 1 y 2

EVALUACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS SUPERFICIALES EN CONDUCTORES

COEFICIENTES DE POTENCIAL, P.

Los coeficientes de potencial son utilizados para evaluar las cargas que se distribuyen a lo largo de los conductores. Se emplea la expresión [Q]= [C][V], donde [Q] y [V] son los vectores de las cargas y los potenciales de los conductores respectivamente (la tierra a potencial cero) y [C] es la matriz de los coeficientes de capacitancias. La matriz de coeficientes de capacitancias se calcula, utilizando los coeficientes de Maxwell (o de potencial) del sistema de electrodos [P], obtenidos aplicando directamente el método de las IMÁGENES.

1. MÉTODO DE IMÁGENES

Es utilizado para el cálculo de campos electrostáticos limitados por superficies conductoras de formas definidas, ó cuando la configuración geométrica está claramente determinada en la frontera entre dos dieléctricos. Es un método artificial, en el cual aparte de las cargas dadas se introducen unas *adicionales,* de una magnitud y posiciones tales, que satisfagan las condiciones de frontera. Territorialmente se ubican allí donde se encuentren las imágenes (de un espejo), geométricamente hablando, de las cargas dadas. No sólo se emplea en electrostática, también se utiliza para cálculos de campos eléctricos en medios conductores y para campos magnéticos. El método se basa y se justifica en el teorema de unicidad a la solución de la ecuación de Laplace, $\nabla^2\varphi = 0$
Las cargas *IMÁGENES* realmente *NO EXISTEN.* La solución sólo es válida en la región exterior, nunca en el espejo.
Esencialmente se busca:
a. Calcular las cargas equivalentes por unidad de longitud del conductor.
b. Calcular el campo eléctrico producido por estas cargas.

Para calcular [C], todos los coeficientes de potencial [P] deben ser calculados con base en la teoría de las imágenes.

2

PRÁCTICA No. 5

EFECTO CORONA EN LOS CONDUCTORES EVALUACIÓN Y ANÁLISIS

Objetivos:
a) Evaluar los pulsos corona, confrontar el inicio de los mismos con el criterio de Peek.

b) Evaluar el efecto corona en conductores. Obtener las pérdidas de potencia en W/m., para una línea de transmisión utilizando los resultados obtenidos para una configuración coaxial.

Procedimiento

1) De acuerdo al montaje indicado en la figura 1, aplicar tensión hasta observar la aparición de pulsos corona.

Figura 1

Comprobar que los pulsos corona no aparecen antes a 0,3*E_c en donde E_c es el gradiente de Peek, según fórmula (3.11) de las conferencias, corregida para valores rms y con m y δ iguales a 1.

2) Para el conductor dado establecer las pérdidas reducidas (P_{red}) para los campos asociados con la tensión aplicada (Tabla 1).

24

Fuente: Rugeles J., Chacón J. C. "*MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN*". 2006.

Debido a que las prácticas del actual manual no tenían una estructura definida, se decidió que todas debían contener los siguientes parámetros:

- Título de la práctica
- Marco teórico
- Procedimiento
- Equipo utilizado (las que lo requieran)
- Hoja de registro de datos
- Bibliografía

La siguiente tabla muestra con una "X" las partes que componen cada una de las prácticas del manual de laboratorio de Alta Tensión.

Tabla 1. Partes que componen cada una de las prácticas del actual manual del Laboratorio de Alta Tensión.

Número de la práctica	**Objetivos**	**Marco teórico**	**Procedimiento**	**Equipo utilizado**	**Hoja de registro de datos**	**Biblio grafía**
1 y 2		X	X			
3		X	X			X
4		X	X			X
5	X		X		X	
6			X	X		
7	X		X		X	
8	X		X		X	
9	X		X	X	X	
10	X		X		X	

Fuente: Autores. 2011.

4.2 REDISEÑO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO QUE LO REQUIERAN.

De acuerdo con la tabla 1 todas las prácticas necesitaron de algún complemento o cambio. En general se realizaron las siguientes tareas:

- Se definieron objetivos que concuerdan con los resultados teóricos y prácticos que conllevan la realización de cada una de ellas.
- Se anexó el marco teórico a las prácticas que no contaban con éste, con el fin de dar una idea clara al estudiante sobre el tema tratado y se complementó el de aquellas que lo requerían.
- El procedimiento de cada práctica se estableció de una forma ordenada, de tal manera que permita obtener los resultados esperados y poder llevar cabo el desarrollo de la experiencia bajo condiciones de seguridad.
- Debido a que no en todas las prácticas se realizan ensayos utilizando los equipos del laboratorio, solo aquellas que lo necesitan presentan una parte en su contenido donde se nombran los equipos necesarios para llevar a cabo la experiencia.
- Cada práctica presenta una hoja de registro de datos que permite consignar parámetros, medidas, resultados, observaciones, entre otras.
- Al final de cada práctica se especificó la bibliografía suficiente para que los estudiantes profundicen el tema correspondiente a cada una de ellas.

La siguiente tabla muestra con una “X” las partes que componen cada una de las prácticas del manual actualizado de laboratorio de Alta Tensión.

Tabla 2. Partes que componen cada una de las prácticas del manual actualizado del Laboratorio de Alta Tensión.

Número de la práctica	Objetivos	Marco teórico	Procedimiento	Equipo utilizado	Hoja de registro de datos	Bibliografía
1	X	X	X		X	X
2	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X		X	X
4	X	X	X		X	X
5	X	X	X	X	X	X
6	X	X	X	X	X	X
7	X	X	X	X	X	X
8	X	X	X	X	X	X
9	X	X	X	X	X	X
10	X	X	X	X	X	X
11	X	X	X	X	X	X
12	X	X	X	X	X	X

Fuente: Autores. 2011.

4.3 INTRODUCIÓN DE NUEVAS PRÁCTICAS EN EL MANUAL DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN.

La utilización y dependencia tanto industrial como doméstica de la energía eléctrica, ha traído consigo la aparición de accidentes por contacto con elementos energizados o incendios, por esta razón se hizo necesaria la implementación de elementos de protección personal (dispositivos, accesorios y vestimentas) que debe emplear el trabajador para protegerse contra posibles lesiones.



El equipo de protección eléctrica personal adecuado consta de varios elementos tales como guantes aislantes, mangas dieléctricas, mantas aislantes, botas aislantes, cascos aislantes, etc.

Con base a lo estipulado en el Manual de Procedimiento y Registros sobre "PRUEBAS DE RIGIDEZ DIELÉCTRICA A ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL", se introdujeron dos prácticas nuevas en el manual de laboratorio de Alta Tensión que son: "PRUEBAS DE RIGIDEZ DIELÉCTRICA A ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL. Parte I: Guantes aislantes de energía eléctrica" y "PRUEBAS DE RIGIDEZ DIELÉCTRICA A ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL. Parte II: Cascos aislantes de electricidad" y corresponden a las practicas número once y doce respectivamente.

Figura 12. Elementos de protección eléctrica personal



Fuente: Cortesía catálogos y folletos técnicos Salisbury.

El procedimiento para realizar la prueba de tensión de ruptura dieléctrica a guantes o cascos aislantes de energía eléctrica consta básicamente de las siguientes etapas:

1. Identificación de las características físicas del elemento y su respectiva clasificación (clase, tipo, tamaño, talla, color, marca y espesor entre otras).
2. Inspección de las superficies interna y externa del elemento, en busca de imperfecciones, incrustaciones, rayones, pinchazos, ramificaciones, arborizaciones, cambios de color y algunos otros defectos que puedan de antemano informarnos la NO aceptación de la prueba y prohibición de utilización como elemento aislante y protector.
3. Realización del montaje para el ensayo, el cual consta de una fuente de tensión a 60 Hz, conectores y electrodos, un recipiente aislado y lleno con agua limpia, equipos de medida como voltímetro, amperímetro y cronometro, adecuada puesta a tierra para los equipos, equipo de control y corte y por supuesto el elemento de prueba.
4. Una vez se ha realizado la prueba, sometiendo el elemento a la tensión de prueba (la cual depende de la clasificación del mismo) y durante el tiempo de prueba, se procede a desenergizar el circuito y hacer el desmonte.
5. Seguidamente se anotan los datos en la hoja de registro y se toma una decisión a cerca de la aceptación ó no del ensayo.

Además se introdujo la medición de la intensidad del campo eléctrico en los puntos cercanos a una línea de alta tensión en la práctica 2 “EVALUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LAS PROXIMIDADES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN” basado en el proceso de medición establecido por el RETIE en el artículo 14.5 y las recomendaciones estipuladas dentro del estándar IEEE 644 DE 1994.

La medición se hace utilizando un medidor de cuerpo libre “Free Body meter” (conocido como medidor a potencial flotante).



Figura 13. Sonda para la medición de la intensidad del campo eléctrico en soporte.



Fuente: Aponte, Guillermo. Experiencia en la medición de campos eléctricos y magnéticos en redes eléctricas. 2006.

El procedimiento para llevar a cabo la medición en la evaluación del campo eléctrico en las proximidades de una línea de transmisión es:

1. Realizar mediciones de campo eléctrico para una configuración determinada, siguiendo recomendaciones generales (altura a la cual debe ser efectuada la medición y orientación de la sonda).
2. Registrar los datos de la las características de la línea medida y las condiciones atmosféricas en la tabla de datos correspondiente.
3. Construir el perfil de campo eléctrico teniendo en cuenta las diferentes distancias (entre medido y operador, medidor y objetos no permanentes, medidor y objetos permanentes), cómo debe ser medida la intensidad del campo eléctrico para el perfil lateral y el longitudinal y por último el número de mediciones a realizar, las cuales se registran en la debida tabla de datos.

4.4 ELABORACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UIS

La consola de control de tensión alterna es la parte de la unidad de alta tensión desde donde se controla el arranque y posterior operación del transformador de

alta tensión durante los ensayos de tensión alterna. La consola de control se puede observar en la figura 5.

Se elaboró un plano del circuito de control del Laboratorio de Alta Tensión que muestra las conexiones existentes entre la consola de control de tensión alterna y los diferentes equipos del laboratorio el cual se muestra en la figura 14.
Las partes que componen el circuito de control del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander son:

- Unidad generadora de impulsos de tensión que consta de:
    - Generador de impulsos, SGS 800/20, de 2,5 kJ por etapas y 800 kV máximos de salida, 8 etapas
    - Consola de control GC 222
    - Unidad de carga LGR 100/15
    - Divisor de tensión de impulsos, CS Capacitivo amortiguado de 1200 kV
- Espinterómetro de esferas
- Sistema trancapuerta
- Unidad de alta tensión alterna que consta de:
    - Consola de control de tensión alterna, entre sus partes principales se encuentran:

      Interruptor principal SWC/1

      Interruptor SWC/2

      Interruptor trancapuerta SWC/3
    - Transformador de alta tensión
    - Conjunto autotransformador – transformador
    - Transformador de corriente
    - Amperímetro
    - Voltímetro
- C1: Contactor marca Telemecanique tipo LC1 D 253 cuyos contactos principales se identifican con los números 1-2(NO), 3-4(NO) y 5-6(NO), también tienen un contacto auxiliar identificado con los números 13-14

(NO). Los terminales de la bobina del contactor están identificados como A1-A2 y además está complementado por un juego de contactos auxiliares marca Telemecanique tipo A 600 P 680, el cual cuenta con cuatro contactos identificados con los números 53-54(NO), 61-62(NC), 71-72(NC) y 83-84(NO)

- C2: Contactor marca Telemecanique tipo LC1 D 633 cuyos contactos principales se identifican con los números 1-2(NO), 3-4(NO) y 5-6(NO), además tiene dos contactos auxiliares identificados con los números 13-14(NO) y 21-22(N). Los terminales de la bobina del contactor están identificados como A1-A2 y además está complementado por un juego de contactos auxiliares marca Telemecanique tipo LA 1 D 22, el cual cuenta con cuatro contactos identificados con los números 53-54(NO), 61-62(NC), 71-72(NC) y 83-84(NO)
- C3: Conctactor marca Klockner – moeller tipo DIL 2M cuyos contactos principales se identifican con los números 1-2(NO), 3-4(NO) y 5-6(NO). Los terminales de la bobina del contactor están identificados como A1-A2.
- FS1: Fusible 100 A
- FS2: Fusible 6 A
- FS3: Fusible 2 A
- Interruptor Tripolar marca IEC 947 (157-1), 220/240 V 25 A, 380/415 V 10 A

Convenciones y nomenclatura:

Línea

Fusible

Bobina de contactor del tranca puerta

Contactor (NO)

Contactor (NC)

Suitche

Microsuitche

Bobina

Interruptor cerrado

Interruptor abierto

Identificador de conductores

Piloto

Amperímetro

Transformador

Autotransformador

En el anexo B se presenta el plano final del esquema de conexiones del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 14. Plano del circuito de control del Laboratorio de Alta Tensión

5. PRESENTACIÓN DEL MANUAL

Se diseño una nueva portada que incluye el logo de la Universidad, su gama crómatica y fotografías de algunos de los elementos que hacen parte del laboratorio de alta tensión, para la presentación del manual con el firme propósito de darle un toque personal y moderno, resaltando el compromiso y la unión entre la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones con la universidad, y esperando que el manual haga parte de publicaciones UIS.

Figura 15. Portada del manual actualizado del Laboratorio de Alta Tensión



Fuente: Autores. 2011.

5.1 COMPONENTES DEL MANUAL

5.1.1 CONTENIDO

El manual fue modificado para hacerlo más ordenado y didáctico pero sobretodo más formal y de acuerdo a las normas básicas de presentación de un libro. En el manual se encuentran doce prácticas a realizar en el laboratorio, las cuales todas constan de título de la práctica, marco teórico, procedimiento, equipo utilizado (las que lo requieran), hoja de registro de datos y bibliografía.
Todas las figuras, tablas y ecuaciones están numeradas y así es más fácil referenciarlas.

Además se añadió el manual de seguridad de los laboratorios de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones y un esquema de conexiones de los aparatos que se encuentran en el laboratorio.

Figuras 16. Modelo de una práctica en el manual actualizado del Laboratorio de Alta Tensión.

PRÁCTICA No. 6

DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE RUPTURA DIELÉCTRICA EN ACEITES AISLANTES

1. Objetivos:

1.1 Analizar los métodos de ensayo propuestos en las normas NTC 2975 y NTC 3218, para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en un aceite aislante.

1.2 Ejecutar un ensayo sobre una muestra de aceite dieléctrico de acuerdo a la norma NTC 2975.

2. Marco teórico:

Se ha comprobado que las propiedades eléctricas de los aparatos que trabajan sumergidos en aceite descienden siempre en servicio a lo largo del tiempo. La causa principal reside en la humedad que el aceite absorbe del aire. Esta humedad se incorpora gracias al proceso de respiración de los transformadores, es decir, por efecto de las dilataciones y contracciones térmicas sucesivas del aceite, que provienen de las variaciones de carga o de la temperatura exterior. Tal efecto se hace perceptible, con aceite por lo demás inalterado, ante la presencia de las más insignificantes cantidades de agua, y se hace extraordinario si la humedad incorporada llega a ser notable, o cuando el aceite presenta ya un cierto grado de envejecimiento o de acidez, así como en el caso de que contenga elementos sólidos en suspensión, polvo, partículas metálicas o aislantes, lo cual ocurre con frecuencia en los transformadores.

La medición de la tensión de ruptura dieléctrica no es en sí un examen de la calidad del aceite, sino una prueba convencional tendiente a detectar la presencia de agua o de otras impurezas en él. Con base en los resultados se puede decidir sobre la oportunidad de seguir un tratamiento de secado y filtrado antes de verterlo a la cuba del transformador.

La Norma NTC recomienda para la determinación de la tensión de ruptura dieléctrica seguir la metodología especificada en las Normas NTC 2975 (ASTM D-877-87) o por la especificada en la Norma NTC 3218 (IEC 156 ó ASTM D-1816-84a). Los parámetros más importantes que se consideran en estas normas son los siguientes:

- Alcance: determinar la tensión de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes. Estos procedimientos se aplican a aceites derivados del petróleo, hidrocarburos, askareles (usados como medios aislantes y refrigerantes) y

56

líquidos de uso común en equipos en los que el aceite es un medio aislante y refrigerante.

- Fuente de alta tensión: se recomienda un transformador elevador conectado a una fuente de baja tensión variable a frecuencia comercial, para obtener la tensión de ensayo requerida.
- Corrientes de cortocircuito: el dispositivo de interrupción automática debe actuar cuando la corriente a través del circuito de la muestra, se encuentre entre ciertos valores específicos.
- Rata de crecimiento de la tensión: se recomienda utilizar un equipo con una curva característica tensión-tiempo aproximadamente lineal en el intervalo deseado de operación y accionado por un motor, con el fin de lograr manualmente un incremento uniforme de la tensión.
- Tipo de electrodos: su forma, material y separación dependen de la metodología empleada, además deben cuidarse y ajustarse al comienzo de cada sesión de ensayos.
- Tipo de probeta: su forma, tamaño y material dependen de la metodología empleada. Deben ser recipientes con los electrodos rígidamente montados y se deben construir de manera que se cumplan ciertas distancias mínimas entre sus partes.
- Toma de muestras: para obtener una muestra del aceite o del líquido que se va a ensayar, se usa un aparato de muestreo apropiado, que corresponda a los métodos indicados en la Norma ASTM D-923. La muestra se debe tomar en una botella seca y limpia sellada herméticamente y cubierta para protegerla de la luz, hasta cuando esté lista para ensayarse.
- Procedimiento: después de identificar todos los factores necesarios para realizar el ensayo, se llevan a cabo una serie de pasos para determinar la tensión de ruptura dieléctrica.
- Reporte: documento organizado que contenga la información y los datos requeridos según la norma empleada.

3. Procedimiento:

3.1 Con base en cada norma (NTC 2975 y NTC 3218), analizar las siguientes variables:

57

- Alcance
- Fuente de alta tensión
- Corrientes de cortocircuito
- Rata de crecimiento de la tensión
- Tipo de electrodos
- Tipo de probeta
- Obtención de la muestra
- Aceite en reposo o con circulación forzada
- Procedimiento
- Análisis de los resultados
- Reporte

3.2 Realizar los ensayos para evaluar la tensión de ruptura dieléctrica de un aceite aislante de acuerdo con el procedimiento establecido en las normas NTC 2975 (ASTM D-877-87).

Los datos obtenidos en cada ensayo se deben consignar en la hoja de registro de datos.

3.3 Hacer el reporte según lo especificado en cada norma.

4. Equipo utilizado:

El equipo a utilizar en estos ensayos es el siguiente.

- Chispómetro marca SIEMENS
- Tensión Primario: 0..216 V
- Tensión Secundaria: 0..60 kV
- Voltímetro análogo:
  - Escala roja indica KV_{ef}, basado en relación de transformación del transformador.
  - Escala negra: indica campo eléctrico en KV_{ef}/cm, calibrado para una distancia de 2,5 mm con electrodos tipo hongo.

58

REGISTRO DE DATOS

MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DISRUPTIVA			
Realizó		Revisó	Fecha
Muestra No		Color	
Temperatura		Viscosidad	
Tipo de probeta	ASTM D-877:	ASTM D-1816:	
Separación entre electrodos	mm:		
Rata de crecimiento de la tensión	3 kV/s:	0,5 kV/s:	
Prueba No.	Lectura V [kV]	Lectura E [kV/cm]	Observaciones
Promedio			
Consistencia estadística: A = mayor valor B = menor valor 3(A-B) = valor siguiente a B Nota: la primera aplicación de la tensión se ignora			

59

5. Bibliografía

1. ROTH Arnold. Técnica de la alta tensión. Barcelona: Editorial Labor, 1966.
2. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia: Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en líquidos aislantes utilizando electrodos de disco. NTC 2975. Bogotá D.C.: El Instituto, 1991.
3. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia: Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en aceites aislantes derivados del petróleo usando electrodos del tipo VDE. NTC 3218. Bogotá D.C.: El Instituto, 1991.
4. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

60

Fuente: Autores. 2011.

En el anexo A se presenta el manual completo del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander.

6. CONCLUSIONES

Proveer cada práctica de marco teórico ayuda a que el estudiante esté mejor preparado antes de acudir al laboratorio al realizarla y de esta manera evitar accidentes por desconocimiento de los procedimientos a realizar, además sirve como complemento al libro de texto utilizado en la materia de alta tensión.

Al darle a todas las prácticas una única apariencia, se logró hacer más formal el manual de prácticas del laboratorio de alta tensión y al mismo tiempo proveer al estudiante de una herramienta más completa para su aprendizaje.

Con ayuda del esquema de conexiones es más fácil identificar cuando algún elemento entre en falla y del mismo modo hacer más sencillo su reemplazo, además los estudiantes tienen una idea clara de cómo funcionan los equipos en el laboratorio.

Aumentar el número de prácticas a realizar hará que el laboratorio se utilice más durante el semestre y dará uso a implementos que a pesar de haberse invertido en ellos no eran tenidos en cuenta y corrían el riesgo de deteriorarse y acortar su vida útil al estar guardados.

Se abre campo para que los estudiantes de la asignatura de Alta Tesnión sigan investigando y mejorando la información contenida en el manual del Laboratorio de Alta Tensión.

7. BIBLIOGRAFÍA

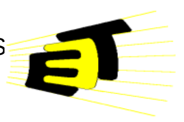
- Rugeles Jones Julio, Chacón Velasco Julio César. "*MANUAL DE LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN*". 2006. Bucaramanga.
- Rugeles Jones Julio. "*CONCEPTOS BÁSICOS EN TÉCNICAS DE ALTA TENSIÓN".* 2ª edición. Ediciones UIS. 1991. Bucaramanga.
- Kuffel E., Zaengl W. S. "HIGH - VOLTAGE ENGINEERING, FUNDAMENTALS". 1º edición. Pergamon Press. 1984. London.
- EPRI: "Transmission Line Reference Book. 345 kV and above". 2ª edición. 1982. Palo Alto. California.
- IEEE Std. 4 – 1995. IEEE Standard Techniques for High – Voltage Testing. New York. 1995.
- IEEE Std. 4a – 2001. Amendment to IEEE Standard Techniques for High – Voltage Testing. New York. 2001.
- IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines. IEEE Std 644. New York, USA: IEEE, 1994. 25 p.
- EPRI. Transmission line reference book, 345 kV and above. 2 ed. Palo Alto, California: J. J. LaForest, 1982.
- Naidu, M. S., Kamaraju V. High voltage engineering. Ed Tata McGraw Hill.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para aisladores de potencia eléctrica. NTC 1285. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia: Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en líquidos aislantes utilizando electrodos de disco. NTC 2975. Bogotá D.C.: El Instituto, 1991.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia: Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en aceites aislantes derivados del petróleo usando electrodos del tipo VDE. NTC 3218. Bogotá D.C.: El Instituto, 1991.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION. Descargadores de sobretensiones de resistencia variable con explosores para redes de corriente alterna. NTC 2166. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION. Higiene y Seguridad. Guantes Aislantes de la Electricidad. NTC 2219. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.

- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION. Cascos de seguridad Industrial. NTC 1523. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.
- ANSI Z89.1. Safety Requeriments for industrial head Protection. New York. 1985.
- ANSI/IEEE Std. C62.11-2006. Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits. New York. 2006.
- ASTM D-120-02a. Standard Specification for Rubber Insulating Gloves. New York. 2006.
- ASTM F-496. Standard Specification for in-service Care of Insulating Gloves. New York. 2006.
- ASTM F-696. Standard Specification for Protectors for Rubber Insulating Gloves and Mittens. New York. 2006.
- ASTM F-1236. Standard Guide for Visual Inspection of Electrical Protective Rubber Products. New York. 2006.
- Torres, H. Protección contra rayos. Icontec, Bogotá. 2007.
- Haefely. “Impulse voltaje test system. Serie 5”. Manual de usuario. 1990.
- H. W. Moss, W. P. Peregrinus. Statistical Techniques for High Voltage Engineering.
- Hileman, A. R. Insulation coordination for power systems. Taylor and Francis Group, 1999.
- Vila, Raúl Omar. Generador de impulsos de 4-etapas en serie. Manuscrito. 1992.
- Roth A. “TÉCNICA DE LA ALTA TENSIÓN”. Editorial Labor. Barcelona.1966.
- Castellanos H.D. “Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta-punta y punta-placa”. Tesis de maestría. UIS. 2002.
- Vargas Edgar. “Pruebas De Tensión De Ruptura Dieléctrica En Equipos De Protección Personal Para Operarios De Línea Viva”. Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.
- John Jairo Cantor Rodríguez, Néstor Javier Ramírez Ardila. “Manual De Seguridad En El Laboratorio De Alta Tensión De La UIS”. Tesis de pregrado de la Universidad Industrial de Santander.
- Fuentes Barrera A.J., Perico Arias R.A. Campo eléctrico en líneas de alta tensión. Comparación crítica de sus valores límites de exposición teniendo como referencia la normatividad colombiana. Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Mecánicas, 2011.
- Aponte, Guillermo. Experiencia en la medición de campos eléctricos y magnéticos en redes eléctricas. 2006.
- Díaz, Julián. Campo eléctrico. Determinación en líneas de alta tensión y estudio de su influencia en los seres humanos. Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Mecánicas, 2000.

- COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 18-1294 (06, agosto, 2008). Reglamente técnico de instalaciones eléctricas (RETIE). Bogotá: El Ministerio, 2008.
- K. J. Kornick. Conferencias. Manchester: UMIST.
- Rakosh Das Begamudre. "EXTRA HIGH VOLTAGE A.C. TRANSMISSION ENGINEERING". New York. 1986.
- ICONTEC. NTC 1285 (segunda revisión).
- ICONTEC. NTC 2975 y NTC 3218.
- Papers y catálogos especializados.
- Material de internet relacionado.

ANEXOS



ANEXO A

LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN
MANUAL DE PRÁCTICAS

Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas



LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN
MANUAL DE PRÁCTICAS

Por:

Julio Rugeles J., Msc

Julio César Chacón V., MPE

Escuela de
Ingenierías
Eléctrica
Electrónica y de
Telecomunicaciones

Facultad de
Ingenierías
Físico
Mecánicas

Universidad
Industrial de
Santander



TABLA DE CONTENIDO

PÁG.

INTRODUCCIÓN 5

MANUAL DE SEGURIDAD EN LOS LABORATORIOS DE LA E3T 7

CONTENIDO DE LOS INFORMES 14

PRÁCTICA No 1. Evaluación del campo eléctrico superficial en los conductores de una línea de transmisión 15

PRÁCTICA No 2. Evaluación del campo eléctrico en las proximidades de una línea de transmisión 23

7.1 PRÁCTICA No 3. Descarga eléctrica en gases 31

PRÁCTICA No 4. Procedimientos de corrección de la tensión de chispa, $V_{50\%}$ 41

PRÁCTICA No 5. Efecto corona en los conductores. Evaluación y análisis 49

PRÁCTICA No 6. Determinación de la tensión de ruptura dieléctrica en aceites aislantes 56

PRÁCTICA No 7. Obtención de formas de onda normalizadas 61

PRÁCTICA No 8. Determinación de la tensión de chispa, $V_{50\%.}$ 73

PRÁCTICA No 9. Ensayos en dispositivos contra sobretensiones (DPS).
Parte I: pruebas en corriente alterna, 60 Hz 80

PRÁCTICA No 10. Ensayos en dispositivos contra sobretensiones (DPS).
Parte II: pruebas de impulso 86

PRÁCTICA No 11. Pruebas de rigidez dieléctrica a elementos de protección personal
Parte I: Guantes aislantes de energía eléctrica 91

INTRODUCCIÓN

El Manual de Laboratorio de Alta Tensión constituye una guía para que los estudiantes lleven a la práctica los conceptos vistos en la asignatura Alta Tensión. En el manual se consignan temas relacionados con los fenómenos producidos por la generación, la transformación y la distribución de la energía eléctrica en altos niveles de tensión.

La realización de este manual tiene como fin acercar a los estudiantes de manera organizada a la realidad; ampliando, consolidando, generalizando y comprobando los fundamentos teóricos de esta disciplina. Además, los orienta en la adquisición de habilidades propias, tanto en técnicas de laboratorio como de investigación, a través de la realización de informes completos y detallados.

Este documento ofrece a los estudiantes información centrada y suficiente para la experimentación, por medio de prácticas de laboratorio que retroalimentan el aprendizaje teórico, y promueven el conocimiento y la investigación. Las prácticas propuestas contienen marco teórico y procedimiento, con lo que se pretende que el estudiante no llegue a la práctica, sin conocer en qué consiste la experiencia que se va a realizar y cuál es el sustento teórico de cada una de ellas.

MANUAL DE SEGURIDAD EN LOS LABORATORIOS DE LA E3T

Todos los estudiantes, funcionarios y profesores deben cumplir estrictamente cada una de las siguientes instrucciones y observaciones de seguridad establecidas para el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

Recomendaciones generales:

- Sea cuidadoso. El descuido es la causa del mayor número de accidentes: PIENSE LO QUE HACE. Su seguridad es exclusivamente responsabilidad propia.

- Al realizar una actividad en el laboratorio, examine cualquier condición insegura e infórmela a sus compañeros y a su profesor y/o laboratorista para que sea corregida inmediatamente y/o se coloquen los avisos correspondientes.

- Todo estudiante debe mantener en el recinto del laboratorio, relaciones cordiales y respetuosas con sus compañeros, su profesor y el laboratorista, teniendo en cuenta que en las áreas de trabajo (bancos), están prohibidas las riñas, juegos, bromas y forcejeos.

- Se prohíbe ingresar y consumir bebidas y alimentos en el laboratorio. También, está prohibido fumar e introducir material inflamable o combustible al laboratorio.

- Evite correr, gritar o silbar en forma inusual y sin razón justificada, porque puede causar alarma o confusión en el laboratorio.

- No se le permitirá la entrada al laboratorio, a quien esté ebrio, dopado o aparente estarlo.

- Se recomiendo (en la medida de lo posible) la utilización de ropa cómoda, fresca y adecuada para el trabajo en el laboratorio, como camisetas ceñidas al cuerpo (sin botones), pantalón largo (jeans) y zapatos cerrados con suela de caucho (por ejemplo, botas).

- Todo estudiante que tenga que trabajar cerca, o con circuitos energizados y máquinas rotativas (motores, generadores), deberá quitarse los anillos, cadenas, pulseras, esclavas, reloj y objetos como lapiceros y herramientas, antes de iniciar labores; además debe evitar el uso de prendas de vestir holgadas, ya que éstas pueden ponerse en contacto con partes energizadas o en movimiento.

- Los riesgos de la utilización de un equipo eléctrico, exigen que las comunicaciones sean claras y precisas y quien las origine, debe verificar que éstas hayan sido bien entendidas. De otra parte, al recibir una instrucción debe estar seguro de haberla entendido. Antes de ejecutar alguna acción, CONFIRME, OBSERVE, PIENSE, ACTÚE.

- Cualquier circuito o terminal eléctrico debe ser considerado y tratado en todo momento, como si estuviera energizado, hasta que su estado sea verificado con el instrumento apropiado (voltímetro, probador de tensión, lámpara de prueba o piloto, etc.). aún la tensión más baja puede ser peligrosa dependiendo de las circunstancias.

- El uso de cualquier parte del cuerpo para determinar si un circuito está energizado, queda estrictamente prohibido. Al hacer conexiones u operar un equipo eléctrico, no coloque parte alguna de su cuerpo en otro circuito, en un equipo puesto a tierra o entre terminales.

- En el caso de un accidente, mantenga la calma y no retire con las manos a la persona que esté en contacto con una tensión eléctrica. Corte el suministro de energía. Utilice algún material dieléctrico o aislante (guantes de caucho, listón de madera, etc.).

- Conozca la ubicación de los extintores para incendios y solicite al laboratorista las instrucciones para aprender a usarlos.

- Para extinguir un incendio en los equipos eléctricos, sólo se deben utilizar elementos no conductores de la electricidad y/o extintores adecuados (CO_2, polvo químico seco). El extintor debe aplicarse directamente en la base de la llama. Coja el extintor de la manilla diseñada para ello, ya que la expansión del CO_2 enfría demasiado la boquilla del extintor. Desconecte siempre las líneas de alimentación eléctrica antes de su uso.

<u>Instrucciones de seguridad para el desarrollo de las prácticas:</u>

- Al realizar una medición o cualquier actividad de laboratorio, primero se debe plantear y estudiar cuidadosamente, el esquema de las conexiones. Todos los aparatos y conexiones requeridas deben ser determinados previamente.

- Es deber de todo estudiante conocer con anticipación el funcionamiento de los equipos que va a utilizar y saber cómo proceder en el caso de una emergencia. Se debe preparar la práctica con anterioridad y estudiar cuidadosamente la guía correspondiente. En el caso de presentarse dudas, siempre consulte al profesor y/o laboratorista. Recuerde: si no conoce un aparato o sistema o si no

está seguro de lo que hace, asesórese para no cometer errores, causar algún daño o provocar un accidente.

- Los estudiantes y/o grupos de práctica deben responder solidariamente por los daños en los equipos, producto de la falta de preparación, irresponsabilidad, desidia o negligencia evidente y comprobable, a partir del concepto técnico del profesor o del laboratorista.

- Consulte en los catálogos y manuales, los valores de placa de los instrumentos, los datos técnicos y las características suministradas por los fabricantes, antes de realizar conexiones y mediciones.

- Compruebe el estado de todo el equipo que se va a utilizar en la práctica, antes de empezar a realizarla y reporte cualquier anomalía que descubra.

- Revise los cables eléctricos y los conectores, reemplace inmediatamente aquellos que estén deteriorados y nunca utilice conductores con aislamiento defectuoso.

- Evite colocar elementos metálicos o líquidos sobre o cerca de los equipos eléctricos, especialmente los equipos que estén abiertos.

- En los bancos de trabajo sólo deben estar los elementos y equipos directamente involucrados con la realización de la práctica. No se deben colocar sobre los bancos elementos como bolsos, maletines, cuadernos, celulares o cualquier otro elemento personal.

- Sea ordenado y organizado al realizar las conexiones. No enrede los cables. En la medida de lo posible, realice el montaje del circuito empleando como guía el color del aislante del conductor (polaridad, tensión, etc.). distribuya los aparatos e instrumentos de medida, de manera que puedan tomarse cómodamente sus lecturas.

- Al hacer conexiones u operar un equipo eléctrico, no coloque parte alguna de su cuerpo en otro circuito, en un equipo puesto a tierra o entre terminales.

- Respete las zonas de tránsito evitando colocar equipos o extender conductores en éstas.

- No realice empalmes. Si esto no puede evitarse, no empalme conductores de diferente calibre o material y asegure el adecuado aislamiento del empalme (e.g., cinta aislante).

- Antes de conectar un borne o empalmar un cable cuyas puntas estén dispersas, realice el trenzado del mismo. Toda conexión debe ser firme, segura y muy bien aislada (no deben quedar conexiones flojas o expuestas sin medio aislante, porque podrían ocasionar daños, accidentes y/o puntos calientes).

- Procure que la estructura metálica de todo equipo eléctrico esté conectada a tierra.

- Las tapas de las cajas de conexiones, cajas de fusibles, cajas de interruptores, etc., deben permanecer cerradas y con todos los tornillos puestos.

- Escoja las secciones (calibres) de los cables y conductores de acuerdo con las corrientes previstas determinadas a partir de los cálculos previos realizados con el esquema de conexión planteado al preparar la práctica.

- Al utilizar los condensadores, debe acatarse estrictamente, el valor de la tensión nominal dado por el fabricante.

- Cuando se empleen equipos con restricción de disipación de potencia (resistencias, reóstatos, potenciómetros, inductancias, etc.), se debe respetar estrictamente, el límite determinado por el fabricante.

- Verifique el burden (potencia nominal) de los transformadores de medida y compárelo con el consumo de potencia de los diferentes aparatos de medida que se van a conectar al transformador.

- Trate los instrumentos de medición con gran cuidado. Evite golpearlos, someterlos a vibraciones, etc.

- Las conexiones entre los aparatos de medición deben ser los más cortas y flexibles posibles, respetando las distancias de seguridad y preferiblemente, utilizando cables con aislante de colores que permitan identificarlas rápidamente.

- En general, no utilice puntas para la conexión de los instrumentos de medida y nunca las utilice para medir corrientes.

- Al colocar los conectores de medición en las clavijas de los instrumentos, fíjese en los signos o marcas dibujadas sobre el aparato. Lo mismo debe hacerse al aplicar las puntas de medición sobre el circuito para registrar tensiones; sin embargo, tal como se indicó en el ítem anterior, no se recomienda el uso de las puntas de medición sobre circuitos energizados.

- Verifique que los amperímetros estén conectados en serie y los voltímetros en paralelo.

- Si es necesario desconectar el circuito secundario de un transformador de corriente, debe cortocircuitar previamente los bornes de salida del transformador. De lo contrario, se producen voltajes muy elevados que pueden causar accidentes o dañar el transformador.

- Para los equipos de medida, escoja siempre los rangos más altos de medición, siempre superiores a los valores que se esperan y que han sido determinados a partir de los cálculos previos donde se ha evaluado (aproximadamente) la magnitud que se va a medir. Por lo tanto, al usar un instrumento de medición de varias escalas, se debe empezar por la mayor (excepto en los óhmetros) para luego seleccionar la escala adecuada de forma que la deflexión de la aguja indicadora, sea superior al 70% de la escala plena. Recuerde que hay que desenergizar el circuito al realizar cada cambio de escala. Todo lo anterior también se aplica para los instrumentos de medida digitales.

- Siempre elija el procedimiento de medición más adecuado según el grado de precisión requerido, la evaluación aproximada de la magnitud que se va a medir y la disponibilidad del equipo necesario.

- Al trabajar con máquinas rotativas, identifique las partes en movimiento expuestas y tome las precauciones necesarias (por ejemplo, colocar guardas) para evitar contactos accidentales con éstas. Por ningún motivo pase sobre una máquina rotativa cuando esté funcionando.

- No pase los cables sobre las máquinas rotativas o cerca de los lugares donde esté expuesto el eje o las partes giratorias de los motores y generadores.

- **NUNCA ENERGICE UN CIRCUITO SIN LA REVISIÓN Y AUTORIZACIÓN EXPRESA DEL PROFESOR O LABORATORISTA.**

- Antes de energizar un circuito asegúrese que:

  a) El circuito esté listo y en el caso de contener máquinas rotativas, éstas deben estar libres para girar en el sentido correcto.

  b) Todas las personas que estén cerca del circuito, así como de los equipos eléctricos, de los motores y/o generadores, sean notificadas de la acción que se va realizar.

c) El interruptor o “breaker” sea de la capacidad adecuada o, si se usa un interruptor de cuchillas, los fusibles sean de la capacidad adecuada para su protección.

- Nunca cierre o abra un interruptor lentamente o con indecisión. Hágalo rápida y decididamente.

- Como regla general, es bueno usar solamente una mano para operar un interruptor y mantener la otra mano libre. No se recargue en las partes conectadas a tierra.

- Nunca se deben modificar las conexiones de un circuito energizado. Apague o desconecte las fuentes (corte visible) y verifique la ausencia de tensión antes de realizar modificaciones en los circuitos de las prácticas, incluyendo la conexión y/o desconexión de instrumentos de medida.

- Nunca se bebe retirar un amperímetro o un vatímetro de un circuito energizado.

- En los multímetros, no se debe cambiar de función con el instrumento conectado al circuito energizado.

- Nunca se deben realizar mediciones de resistencia, capacitancia o inductancia en elementos energizados.

- En los laboratorios donde las tensiones sean inferiores a 1000 V, mantenga estrictamente una distancia mínima de 30 cm a los conductores energizados y/o borneras. En el Laboratorio de Alta Tensión, las distancias de seguridad son mucho mayores y se requiere un protocolo especial de seguridad que se debe consultar al profesor encargado de la orientación de la práctica.

- No sobrecargue las bobinas o circuitos de corriente de los instrumentos de medida. Revise los circuitos para evitar corrientes accidentales altas que sobrecalienten y destruyan los instrumentos. Debe verificarse continuamente la temperatura de todos los instrumentos de medida, de los equipos y de los dispositivos utilizados. El humo, el olor a barniz y/o la condensación del agua sobre los cristales, son las manifestaciones inequívocas de sobrecargas que se presentan cuando la potencia es pequeña pero la corriente o la tensión sobrepasa los límites.

- No levante las escobillas de un conmutador (máquinas de CC) o de un anillo colector (máquinas de CA) con la máquina funcionando.

- Las fuentes de alimentación no deben mantenerse conectadas permanentemente.

- Cultive el hábito de voltear la cara siempre que un arco eléctrico pueda ocurrir, por ejemplo, al cerrar y abrir los interruptores. La luz producida por estos arcos es muy intensa y contiene radiaciones peligrosas para la vista. No debe mirarla, pues aún con una corta exposición, los ojos pueden sufrir lesiones.

- Procure no abrir los circuitos de alta corriente con interruptores de cuchillas o seccionadores. Todos los bancos de trabajo cuentan con interruptores apropiados para la desconexión de los circuitos bajos carga que se deben accionar antes de abrir las cuchillas con las que se garantiza el “corte visible”.

- Después de desconectar la fuente de alimentación de los circuitos capacitivos o con la posibilidad de estar cargados estáticamente, aterrícelos antes y durante su manejo.

- No intente frenar el eje de una máquina rotativa después de haberla desconectado. Espere pacientemente a que éste se detenga por sí solo.

- No toque los bornes de un generador o motor (CC o CA) hasta que se haya desconectado su excitación y su eje se haya detenido por completo.

- Es obligación de todos los estudiantes mantener los equipos y bancos de trabajo limpios y organizados.

- Una vez terminada la práctica, desconecte las fuentes y desarme el circuito, separe y ordene los cables y conectores empleados, colóquelos en los sitios dispuestos para ello, y devuelva los equipos al almacén y cerciórese de que el banco de trabajo quede limpio y los equipos en los sitios respectivos.

CONTENIDO DE LOS INFORMES

Los resultados obtenidos en cada práctica de laboratorio se deben presentar a través de un informe de laboratorio que debe contener como mínimo los siguientes elementos:

1. Objetivos

2. Marco teórico

3. Equipo utilizado

4. Esquemas

5. Procedimientos

6. Tablas de datos

7. Resultados y sus respectivos análisis

8. Resolución de puntos de investigación

9. Conclusiones

10. Bibliografía

El informe de laboratorio se debe entregar en la siguiente sesión después de realizada la práctica.

PRÁCTICA No. 1

EVALUACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS SUPERFICIALES EN LOS CONDUCTORES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN (LT)

1. Objetivos:

1.1 Estimar el campo eléctrico producido por las cargas equivalentes presentes en los conductores de líneas de transmisión eléctrica.

1.2 Comparar los resultados obtenidos por el método de las imágenes con los obtenidos por las fórmulas abreviadas.

2. Marco teórico:

Las líneas de transmisión de alta tensión generan un campo eléctrico de frecuencia industrial, con una intensidad que depende de diversos factores, tales como la tensión de la línea, la potencia que transportan, la geometría del apoyo, el número de conductores por fase, la distancia de los cables al suelo, etc. Con el fin de obtener el valor del campo eléctrico presente en la superficie de los conductores, se pueden utilizar diversas metodologías; dentro de las cuales a continuación se describen algunas de ellas:

2.1 Método de las imágenes

Es utilizado para el cálculo de campos electrostáticos limitados por superficies conductoras de formas definidas, ó cuando la configuración geométrica está claramente determinada en la frontera entre dos dieléctricos. Es un método artificial, en el cual aparte de las cargas dadas se introducen unas ADICIONALES, de una magnitud y posiciones tales, que satisfagan las condiciones de frontera. Territorialmente se ubican allí donde se encuentren las imágenes (de un espejo), geométricamente hablando, de las cargas dadas. No sólo se emplea en electrostática, también se utiliza para cálculos de campos eléctricos en medios conductores y para campos magnéticos. El método se basa y se justifica en el teorema de unicidad a la solución de la ecuación de Laplace $\nabla^2 V = 0$.

Las cargas IMÁGENES realmente NO EXISTEN. La solución sólo es válida en la región exterior, nunca en el espejo.

Se asume que los conductores son infinitamente largos, paralelos al plano de la tierra y que esta es suficientemente buena conductora.

Para calcular el campo eléctrico producido en la superficie de los conductores, es necesario conocer las cargas equivalentes por unidad de longitud en los conductores.

La relación general utilizada para el cálculo de las cargas en los conductores se expresa matricialmente de la siguiente manera:

$$[\boldsymbol{Q}] = [\boldsymbol{c}][\boldsymbol{V}] \qquad (\mathbf{1.1})$$

Donde:
[Q] - vector de cargas
[c] - matriz de coeficientes de capacitancia
[V] - vector de las tensiones

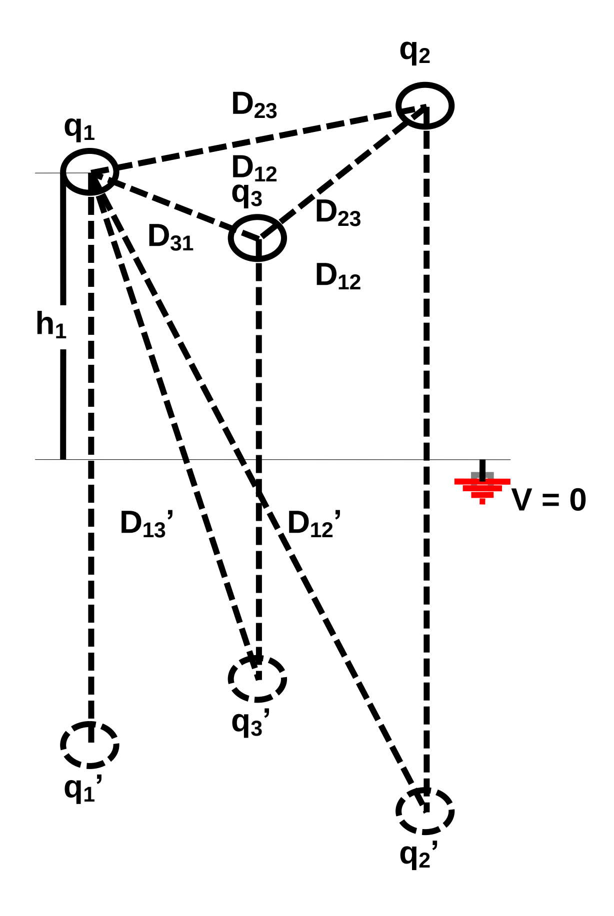


Figura 1.1 Representación de una LT y de su imagen

La matriz de coeficientes de capacitancias se calcula, utilizando los coeficientes de potencial o de Maxwell, del sistema de electrodos [P], obtenidos aplicando directamente el método de las IMÁGENES.

Los coeficientes de potencial [P] se hallan de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \, ln\left(\frac{D'_{ij}}{D_{ij}}\right) \qquad (1.2)$$

$$i \neq j$$

$$P_{ij} = P_{ji}$$

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \, ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \qquad (1.3)$$

Donde:
ϵ_0 = 8,854x10^{-12} [F/m]
i = 1, 2, 3,...n conductores
r_i - radio del conductor (si hay n conductores en haz, r_i corresponderá al r_{eq} del haz)

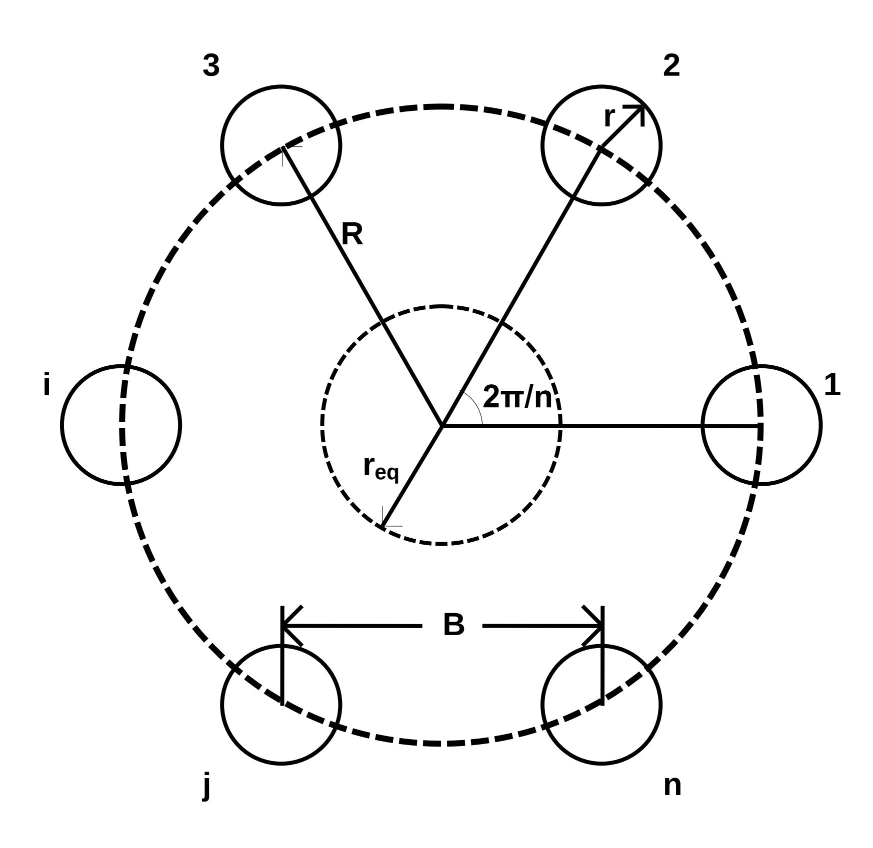


Figura 1.2 Distribución geométrica de una fase con “n” conductores en haz

$$r_{eq} = R\left(\frac{n\,r}{R}\right)^{1/n} \qquad (1.4)$$

Donde:
r - radio de cada subconductor
n - número de subconductores en el haz
R - radio geométrico del haz
r_{eq} - radio equivalente de la fase

El radio geométrico del haz R, se encuentra utilizando la siguiente expresión:

$$R = \frac{B}{2sen\left(\frac{\pi}{n}\right)} \qquad (1.5)$$

Donde:
B - separación entre dos subconductores consecutivos en un haz
n = 1, 2, 3,…n conductores

Para un sistema trifásico, el vector de diferencia de potenciales está dado por:

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{V}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1\angle 0^O \\ 1\angle 120^O \\ 1\angle -120^O \end{bmatrix} \qquad (1.6)$$

Donde:
V - tensión de línea del sistema [kV]

Por inversión de la matriz de coeficientes de potencial se obtiene la matriz de coeficientes de capacitancias:

$$[c] = [P]^{-1} \qquad (1.7)$$

Con la cual finalmente se halla el vector de las cargas de acuerdo a la ecuación (1.1).

Una vez determinadas las cargas por unidad de longitud, la intensidad del campo eléctrico se calcula utilizando el teorema de Gauss:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\rho} \qquad (1.8)$$

Donde ρ es la distancia desde el conductor hasta el punto en el cual se desea calcular el campo eléctrico. Se asume que la carga se concentra en "el eje" del conductor como una carga lineal ρ_L, y se calcula el campo eléctrico máximo en la superficie del conductor, $E_{máx}$.

2.2 Fórmulas abreviadas

- **Fórmulas de Mangoldt (Markt - Mengele)**

En el caso de una línea trifásica en AC con configuración horizontal de las fases (ver fig. 1.3), es posible encontrar los $E_{máx}$ por procedimientos abreviados utilizando las ecuaciones (1.9) y (1.10) conocidas como las fórmulas de Mangoldt o Markt - Mengele [4].

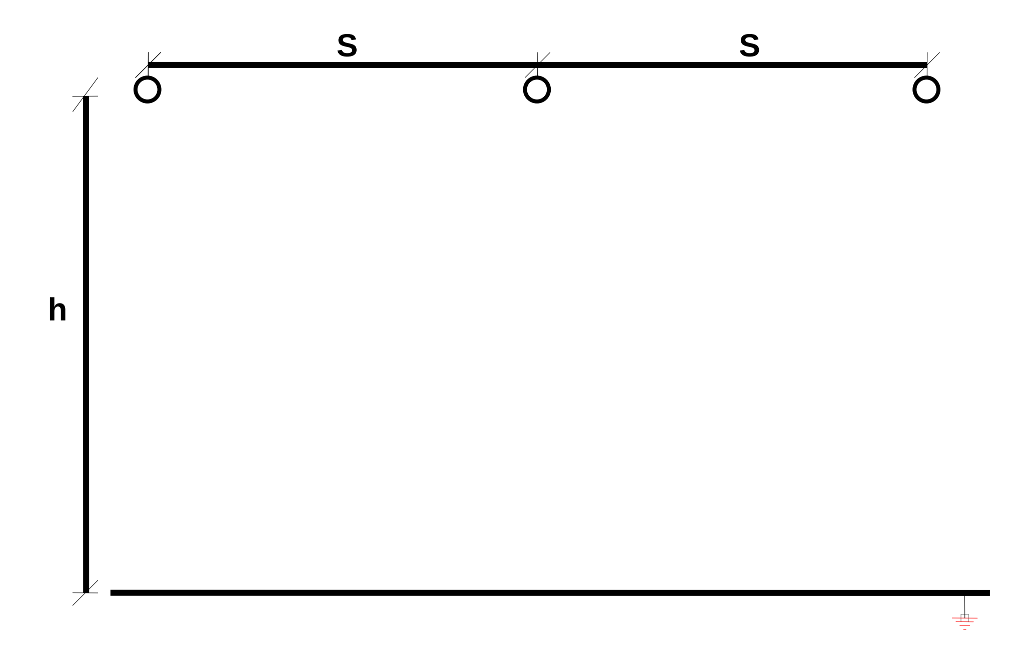


Figura 1.3 Representación de una LT con configuración horizontal de las fases

El gradiente de potencial superficial máximo para las fases exteriores puede ser encontrado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_{om} = \frac{\left[1 + (n-1)\frac{r}{R}\right] V}{n\, r\, ln\left[\frac{2h}{r_{eq}\left[\left\{1+\left(\frac{2h}{S}\right)^2\right\}\left\{1+\left(\frac{h}{S}\right)^2\right\}\right]^{1/4}}\right]} \qquad (1.9)$$

Para la fase central:

$$E_{cm} = \frac{\left[1 + (n-1)\frac{r}{R}\right]V}{n\,r\,ln\left[\frac{2h}{r_{eq}\left[\left\{1+\left(\frac{2h}{S}\right)^2\right\}\right]^{1/2}}\right]} \quad (1.10)$$

Donde:
V - tensión de fase [kV]
S - espaciamiento efectivo entre fases

- **Fórmula de Timascheff**

Otro de los métodos para calcular los campos eléctricos superficiales en los conductores de líneas de transmisión con disposiciones en haz, fue desarrollado por Timascheff[1]. En él se muestra que el radio equivalente de un conductor sencillo[2], con el mismo gradiente máximo superficial de una configuración en haz, se puede encontrar de acuerdo a:

$$r_{eq} = \left[r\,n\left(\frac{B}{2sen\left(\frac{\pi}{n}\right)}\right)^{n-1}\right]^{1/n} \quad (1.11)$$

Donde:
r - radio del subconductor
n - número de subconductores en el haz
B - separación entre subconductores

El campo eléctrico máximo en la fase (con conductores en haz) se encuentra utilizando la siguiente expresión:

$$E_{máx} = \frac{V}{\sqrt{3}\frac{n\,B}{\left(\frac{B}{r}\right)+2(n-1)sen\left(\frac{\pi}{n}\right)}ln\left(\frac{Y}{r_{eq}}\right)} \quad (1.12)$$

---

1 Timascheff. Trans. IEEE, 56 pt. III, 1961, pp 590-597.

2 Se puede mostrar que la ec. 1.11 es realmente la misma ec. 1.4

Donde Y, el espaciamiento efectivo entre fases que con buenas aproximaciones es:

- Para una configuración vertical doble circuito, es la separación entre fases (Y=S).

- Para configuraciones horizontales o en delta, es la separación entre una fase y la fase central dividida por $\sqrt[3]{2}$ $(Y = \frac{S}{\sqrt[3]{2}})$.

V - tensión de línea [kV]

El campo eléctrico calculado por Timascheff se refiere al valor máximo reportado en la línea de transmisión.

3. Procedimiento:

3.1 Para la configuración horizontal mostrada en la fig. 1.3, calcular los $E_{máx}$ superficiales en los conductores, utilizando las metodologías presentadas anteriormente.

La LT tiene dos subconductores por haz. El nivel de tensión de la línea es de 400 kV, el diámetro de cada uno de ellos es de 3,18 cm.

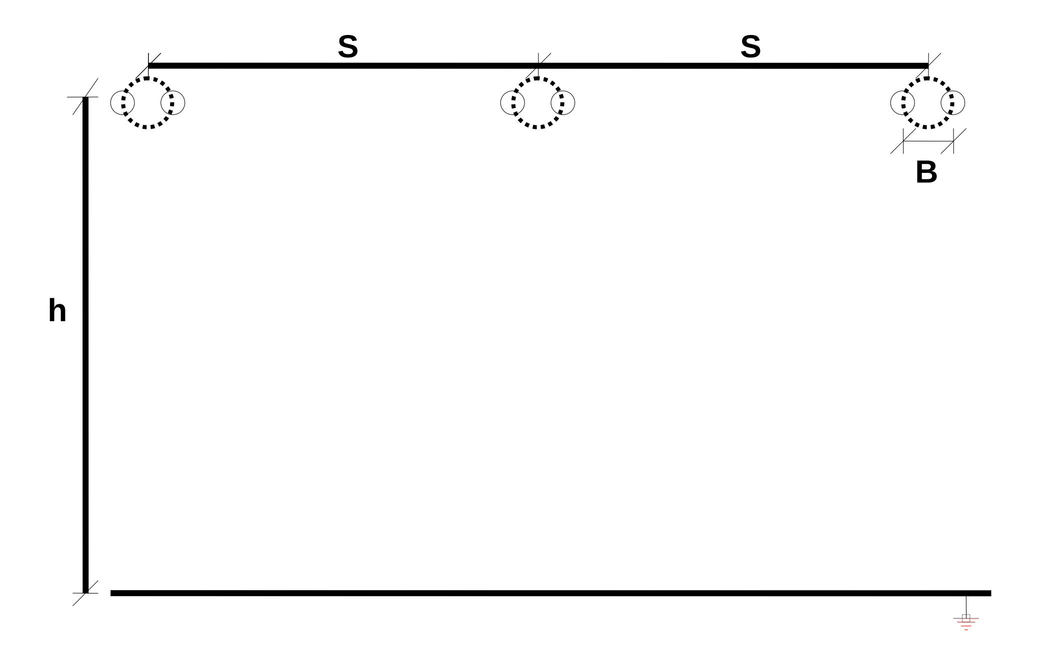


Figura 1.4 Configuración horizontal de una LT de 400 kV

h = 15 m (altura desde la tierra a la fase)
S = 11 m (separación entre fases)
B = 45,72 cm (separación entre subconductores)

3.2 Utilizar el programa de computador nivel, ambiente Matlab, para correr diferentes disposiciones y encontrar los $E_{máx}$ superficiales.

Comparar los resultados obtenidos con los valores presentados en el texto del EPRI. [3]

3.3 Calcular la potencia reactiva, originada por la capacitancia de una línea de transmisión completamente transpuesta, utilizando la expresión:

$$\boldsymbol{VA_{\emptyset} = V_{\emptyset} I_{\emptyset}} \quad (\mathbf{1.13})$$

Donde:

$$\boldsymbol{I_{\emptyset} = \omega C_{\emptyset} V_{\emptyset}} \quad (\mathbf{1.14})$$

$$\boldsymbol{C_{\emptyset} = c_s - c_m} \quad (\mathbf{1.15})$$

C_{ϕ} - capacitancia por fase de la línea de transmisión [F/m]
c_s - coeficiente de capacitancia propia [F/m]
c_m - coeficiente de capacitancia mutua [F/m]

4. Bibliografía:

1. RUGELES, Julio y CHACÓN, Julio. Manual de laboratorio de alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2006.

2. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

3. EPRI. Transmission line reference book, 345 kV and above. 2 ed. Palo Alto, California: J. J. LaForest, 1982.

4. BEGAMUDRE, Rakosh D. Extra high voltage A.C. transmission engineering. ___. New York: John Wiley, 1986.

5. K. J. Kornick. Conferencias. Manchester: UMIST.

6. Artículos especializados:

- Fast Calculation of Gradients for the Center Phase of a Three-Phase Bundle Conductor Line with Any Number of Subconductors ANDREW S. TIMASCHEFF, FELLOW, IEEE.

- http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/1055/5/T10862CAP3.pdf

EVALUACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LAS PROXIMIDADES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

1. Objetivos:

1.1 Estimar el campo eléctrico presente en las proximidades de una línea de transmisión, producido por las cargas equivalentes presentes en los conductores.

1.2 Identificar los efectos y las consecuencias debidas a la existencia de campos eléctricos en las proximidades de una línea de transmisión.

2. Marco teórico:

Los conductores de una línea de transmisión de cierta tensión producen en sus alrededores un campo eléctrico cuya intensidad se expresa en kV/m. La intensidad del campo eléctrico depende entre otros factores, de la tensión de operación de la línea, de su configuración y de la distancia del punto de medición a los conductores.

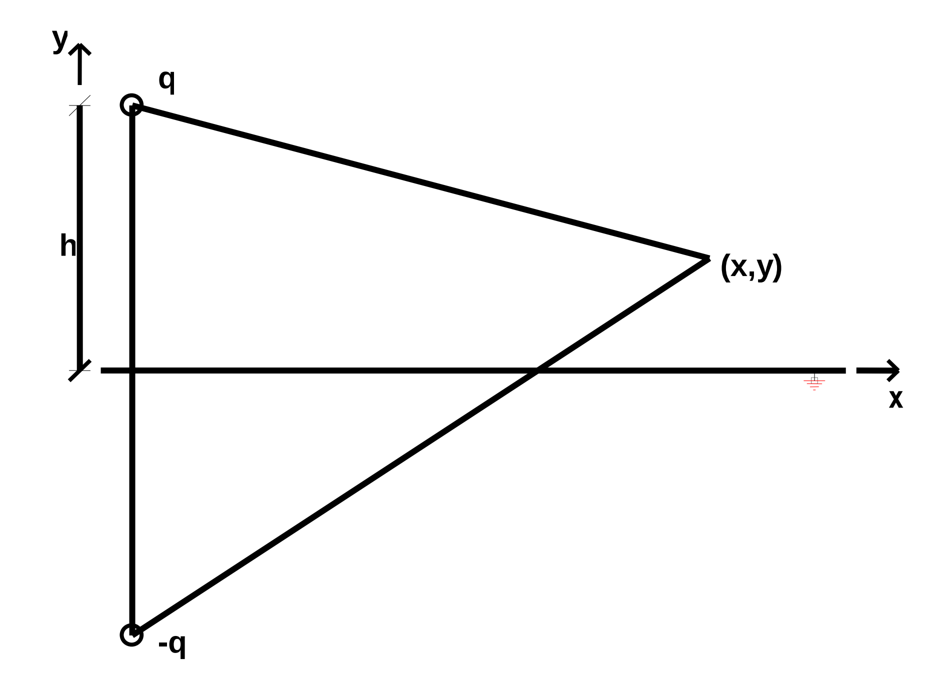


Figura 2.1 Representación esquemática de un conductor de una LT y de su imagen

Para calcular las cargas por unidad de longitud presentes en los conductores de la línea, se utiliza el método de las imágenes.

El vector de campo eléctrico que se genera en una línea de potencia, rota en el espacio y describe una elipse, como puede observarse en la fig. 2.2 Debajo de los conductores, a una altura entre 0 y 2 m sobre el nivel del suelo, la componente vertical del campo eléctrico, que cambia de valor con la posición horizontal, varía poco con la altura. En esta región, la componente horizontal del campo eléctrico es pequeña, pero puede volverse significativa cuando aumenta la distancia lateral desde los conductores.

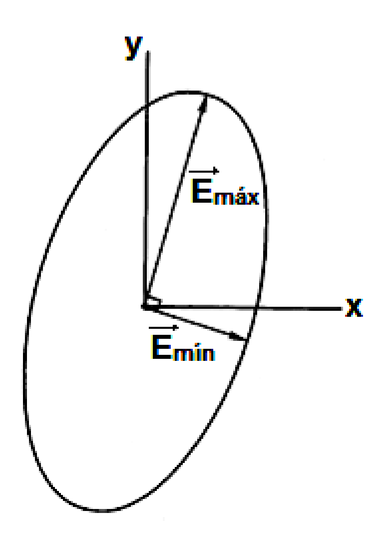


Figura 2.2 Elipse descrita por un vector de campo eléctrico, que se encuentra rotando en un plano en el espacio. Tomado de [7].

Las componentes E_x y E_y de la intensidad del campo eléctrico E en el punto (x,y) se expresan de acuerdo a:

$$\vec{E} = E_x\overrightarrow{a_x} + E_y\overrightarrow{a_y} \qquad (2.1)$$

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon_0}\left[\frac{x-d}{(x-d)^2+(y-h)^2} - \frac{x-d}{(x-d)^2+(y+h)^2}\right] \qquad (2.2)$$

$$E_y = \frac{q}{2\pi\epsilon_0}\left[\frac{y-h}{(x-d)^2+(y-h)^2} - \frac{y+h}{(x-d)^2+(y+h)^2}\right] \qquad (2.3)$$

Donde:
q - carga equivalente por unidad de longitud en el conductor [C/m]
(d, h) - coordenadas del conductor
(d, -h) - coordenadas de la imagen del conductor

Si el campo se calcula al nivel de la tierra, y = 0, $E_x = 0$, solo se tiene en cuenta la componente en y, calculada de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{E_y = \frac{q}{\pi\epsilon_0}\left[\frac{h}{(x-d)^2+h^2}\right]} \qquad (2.4)$$

Para sistemas polifásicos, el campo resultante en cada punto del espacio es un campo eléctrico elíptico rotacional. Sin embargo, a nivel de tierra la elipse se degenera y el campo es perpendicular al plano de tierra. En la zona entre 0 y 2 metros sobre el nivel de la tierra, la componente vertical del campo eléctrico es uniforme y la componente horizontal es despreciable.

En la mayoría de los casos el efecto del cable de guarda no es notable, de tal manera que en los cálculos se puede despreciar.

El valor del campo inicialmente es uniforme, pero se distorsiona con la presencia de objetos dentro de él, dependiendo de la capacitancia que originen (tamaño, forma, etc.). En este caso se analiza un campo adicional (migración de cargas hacia objetos inmersos dentro del campo original). Se tiene un nuevo campo perturbado (E), compuesto por el original (E_o) y por el adicional. Para el caso de una esfera conductora E > 3 E_o.

Se han realizado estudios con los cuales se ha detectado que el umbral de percepción del campo eléctrico por las personas es de aproximadamente 10 kV/m, y que, en circunstancias especiales, algunos individuos pueden detectar campos de 3 kV/m. En cuanto a las personas sometidas a estudios con campos de hasta 20 kV/m, se manifiestan en ellas, en forma débil, algunos efectos en sus parámetros vitales, los que son reversibles y están dentro de la dispersión natural de ellos. No se ha detectado impactos nocivos en las personas ni secuelas dañinas.

El campo eléctrico natural originado en la superficie de la tierra es de 100 V/m a 150 V/m, mientras que ante, por ejemplo la descarga de un del rayo, se alcanzan valores de campo eléctrico hasta de 2 MV/m.

De acuerdo a la reglamentación colombiana [1] se tiene que 5 kV/m corresponden al límite de campo eléctrico al cual puede ser expuesto el público en general sin riesgos para la salud.

2.1 Medición de la intensidad del campo eléctrico en los puntos cercanos a una línea de alta tensión.

Es posible medir la intensidad del campo eléctrico en líneas de alta tensión de CA utilizando un medidor de cuerpo libre "Free Body meter" (también conocido como medidor a potencial flotante) el cual apropiado para las mediciones de tipo inspección debido a que es portátil, permite mediciones por sobre el plano de tierra, y no requiere de una referencia de tierra conocida. Por ello, este tipo de medidor es recomendado para mediciones a la intemperie ó en terreno, cerca de las líneas de alta tensión.
Un medidor de intensidad de campo eléctrico se compone de dos partes, la sonda y el detector. Para los medidores de cuerpo libre disponibles comercialmente, el detector está contenido usualmente dentro de la sonda, o es una parte integral de esta última. La sonda y el detector son introducidos dentro del campo eléctrico a medir, por medio de una pértiga aislante. El detector mide la corriente inducida de estado estable o la carga oscilante entre las mitades conductoras (electrodos) de la sonda.

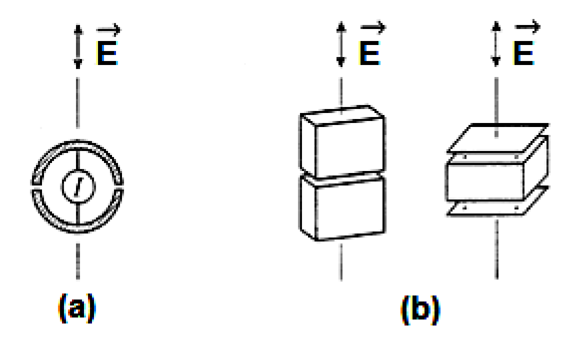


Figura 2.3 Geometrías típicas de las sondas para la medición del campo eléctrico: (a) sonda esférica, y (b) sondas comerciales en EE.UU. Tomado de [6].

3. <u>Procedimiento:</u>

3.1 Para la configuración mostrada, construir el perfil del campo eléctrico utilizando el programa perfiles para una altura sobre el nivel de la tierra de 1 m.

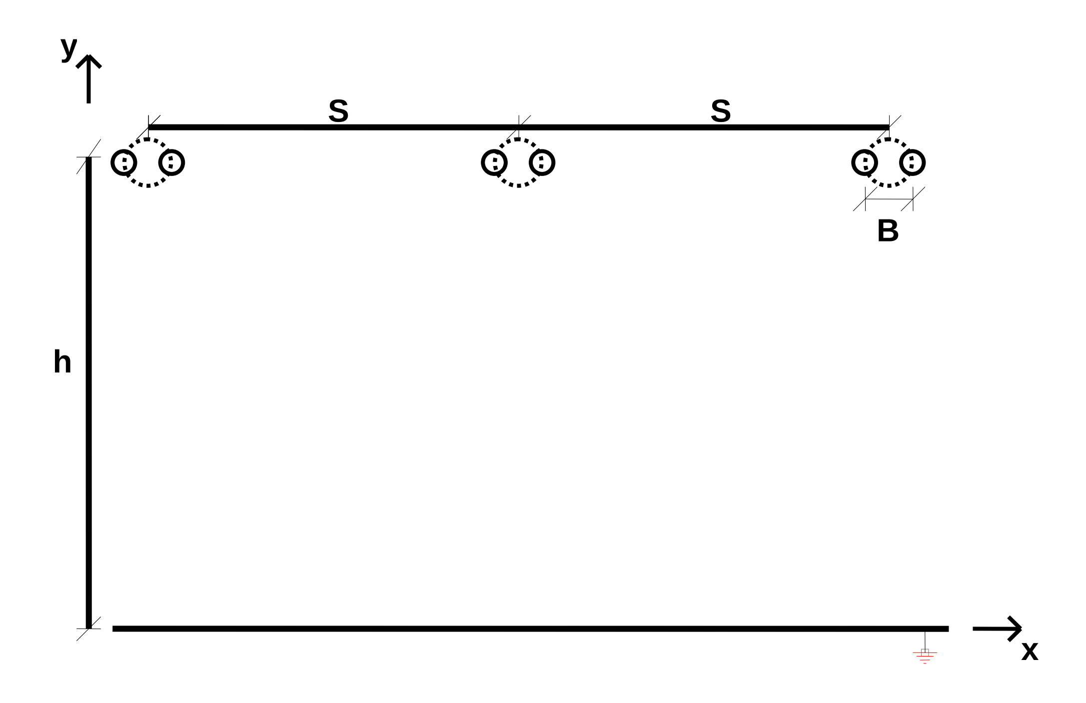


Figura 2.2 Configuración de una LT de 230 kV

V = 230 kV
S = 10 m
h = 14 m
B = 45,72 cm

3.2 Verificar si la configuración mostrada en el primer punto cumple con niveles de E permisibles de acuerdo al RETIE; si no los cumple, explique los cambios que se podrían realizar en el diseño de la línea para ajustarse a ellos.

3.3 Utilizar el programa perfiles, ambiente Matlab, para calcular el campo eléctrico a 1 m de la superficie de la tierra para diferentes configuraciones de líneas de transmisión.

3.4 Realizar mediciones de campo eléctrico para una configuración determinada, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones generales: las mediciones se deben efectuar a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, tal y como se muestra en la fig. 2.4. La sonda debe estar orientada para leer la componente vertical de la intensidad del campo eléctrico.



Figura 2.4 Configuración que permite sostener el medidor de intensidad de campo eléctrico en una posición correcta, conservando la altura estipulada en la norma (1 m) y manteniendo una distancia prudente al observador para minimizar el efecto de proximidad. Tomado de [4].

3.5 Construir el perfil de campo eléctrico y comparar con el simulado.

- La distancia entre el medidor de intensidad de campo eléctrico y el operador debe ser de al menos 2,5 m.

- La distancia entre el medidor y los objetos no permanentes, debe ser de al menos tres veces la altura del objeto, con el fin de medir el valor del campo no perturbado.

- La distancia entre el medidor y los objetos permanentes debe ser por lo menos de 1 m.

- El perfil lateral o transversal, de la intensidad del campo eléctrico a lo ancho de la zona de servidumbre, debe ser medido en intervalos seleccionados iguales.

- Se deben realizar por lo menos 5 mediciones equidistantes mientras se está bajo los conductores.

- El perfil longitudinal de la intensidad de campo eléctrico debe ser medido en el lugar del eje de la línea donde el campo es máximo, en el punto medio del vano o en otros puntos de interés.

Tabla 2.1 Características generales de la LT

LÍNEA: _________________ (nombre de la línea)
CONFIGURACIÓN: Horizontal ☐ Delta ☐ Vertical ☐ SEPARACIÓN [m]:___________ ALTURA [m]:___________ No de CIRCUITOS: ☐ No de CONDUCTORES POR FASE: ☐ Tipo ESTRUCTURA: Metal ☐ Madera ☐ Concreto ☐ Otros ☐
CONDUCTORES: Tipo:___________ Diámetro [cm]:___________
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS: Tipo clima: Seco ☐ Lluvioso ☐ Despejado ☐ Otro ☐ t [°C]:___________ p [mmHg]:___________ h_r, %:___________ Velocidad del viento, m/s:___________

Tabla 2.2 Mediciones

PERFIL LONGITUDINAL	
No	E [kV/cm]
1	
2	
3	
4	
5	
PERFIL TRANSVERSAL	
No	E [kV/cm]
1	
2	
3	
4	
5	

4. Bibliografía:

1. COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 18-1294 (06, agosto, 2008). Reglamente técnico de instalaciones eléctricas (RETIE). Bogotá: El Ministerio, 2008.

2. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

3. DÍAZ, Julián. Campo eléctrico. Determinación en líneas de alta tensión y estudio de su influencia en los seres humanos. Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Mecánicas, 2000.

4. APONTE, Guillermo. Experiencia en la medición de campos eléctricos y magnéticos en redes eléctricas. 2006.

5. FUENTES BARRERA A.J., PERICO ARIAS R.A. Campo eléctrico en líneas de alta tensión. Comparación crítica de sus valores límites de exposición teniendo como referencia la normatividad colombiana. Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Mecánicas, 2011.

6. IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines. IEEE Std 644. New York, USA: IEEE, 1994. 25 p.

7. EPRI. Transmission line reference book, 345 kV and above. 2 ed. Palo Alto, California: J. J. LaForest, 1982.

8. BEGAMUDRE, Rakosh D. Extra high voltage A.C. transmission engineering. ___. New York: John Wiley, 1986.

9. Artículos especializados:

   - Campo eléctrico de líneas de transmisión de Extra Alta Tensión y el Medio Ambiente. ENDESA. Chile.

PRÁCTICA No. 3

DESCARGA ELÉCTRICA EN GASES

1. Objetivos:

1.1 Analizar la teoría de las descargas eléctricas en gases según las investigaciones de Townsend y revisar el criterio de chispa.

1.2 Analizar la teoría de descargas según Paschen y confrontarla con la de Townsend.

1.3 Graficar las relaciones $\bar{\alpha}$/p = f(E/p) para el aire y para el SF_6, y analizar los resultados.

2. Marco teórico:

2.1 Descarga eléctrica en gases según Townsend

Las primeras experiencias asociadas con las descargas eléctricas en los gases fueron realizadas por Townsend. Inicialmente con E = 0, se tiene un estado de equilibrio el cual se mantiene hasta aplicar un campo suficientemente alto.

Townsend estudió la variación de la corriente en un gas para un sistema de placas planas y paralelas, en función de la tensión aplicada; observó, que la corriente se incrementa proporcionalmente a la tensión aplicada, permaneciendo constante en un valor i_o, conocido como corriente de saturación. A una tensión mayor, la corriente aumenta por encima de i_o en forma exponencial; esta relación entre la corriente y la tensión se ve en la fig. 3.1. A medida que el campo se incrementa, los electrones que dejan el cátodo son acelerados más y más entre colisiones, hasta que ganan la suficiente energía para causar la ionización por colisiones, con moléculas o con átomos del gas. Este incremento de corriente, es justificado por Townsend a través de la introducción del *coeficiente de ionización* o *primer coeficiente de Townsend* α.

Este coeficiente α, se define como el número de electrones producidos por un electrón, por unidad de longitud de trayectoria, en la dirección del campo.

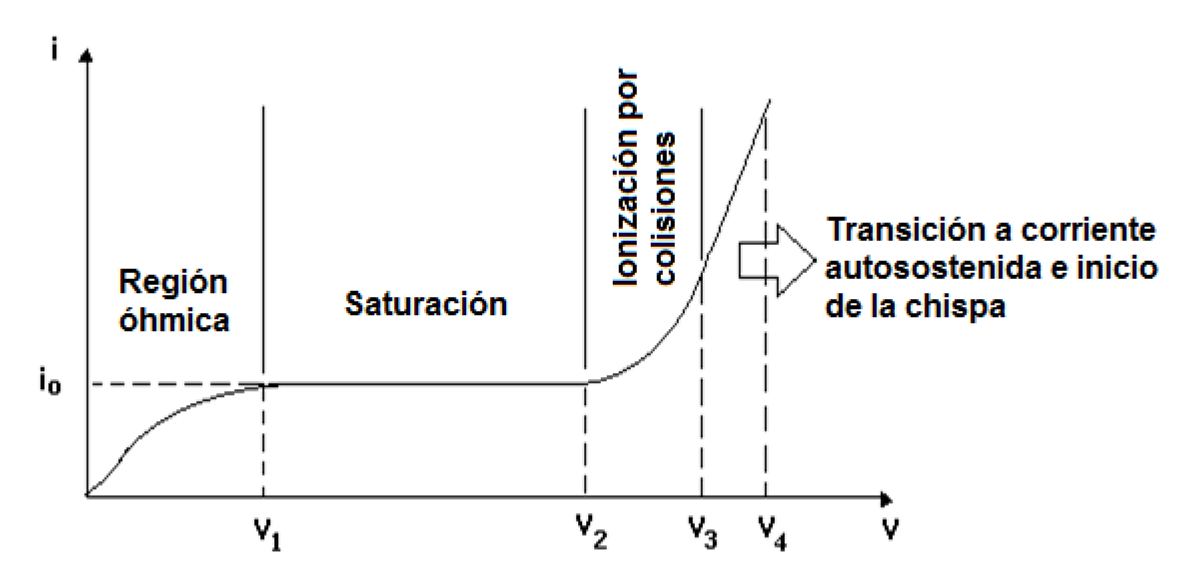


Figura 3.1 Característica estacionaria corriente-tensión. Modificado de [1].

Si se asume que "n" es el número de electrones en la distancia "x" desde el cátodo en la dirección del campo, el incremento de electrones "dn" en la distancia "dx" será:

$$dn = \alpha\, n\, dx \qquad (3.1)$$

Lo que conduce a:

$$n = n_0 e^{\alpha d} \qquad (3.2)$$

Donde:
n_o - número de electrones
d - separación entre placas

En términos de corriente se tiene:

$$i = i_0 e^{\alpha d} \qquad (3.3)$$

El factor $e^{\alpha d}$, se conoce como avalancha de electrones y representa el número de electrones producido por un electrón, al pasar del cátodo al ánodo.

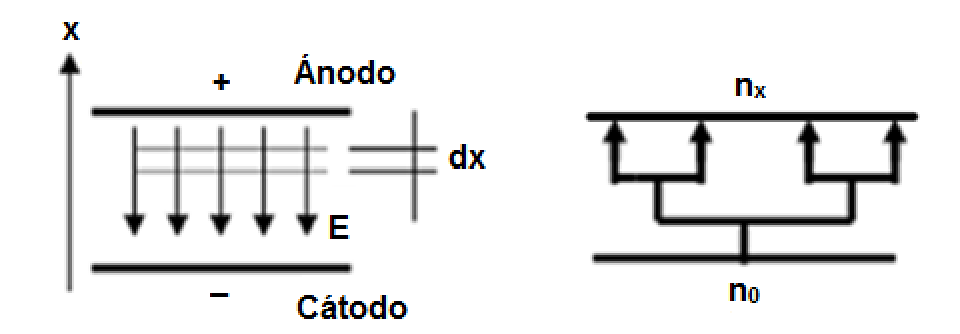


Figura 3.2 Representación esquemática de la avalancha de electrones. Modificado de [1].

El termino α es una cantidad que se determina de una dependencia existente entre el campo eléctrico (E) y la presión (p) a la que se encuentra el gas.

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \qquad (3.4)$$

La ecuación (3.2) se confirma experimentalmente y conduce a la siguiente formulación matemática:

$$\frac{\alpha}{p} = Ae^{\left[\frac{-B}{(E/P)}\right]} \qquad (3.5)$$

Donde se asume que la presión “p” es una cantidad constante.

Generalmente nunca se espera que (α/p) se encuentre de acuerdo con (E/p) en todo el rango de aplicación, ya que existen muchos fenómenos que no se tienen en cuenta en el proceso de ionización.

Teóricamente A y B se definen de acuerdo a:

$$A = \frac{\sigma_i}{kT} \qquad (3.6)$$

$$B = \frac{V_i \sigma_i}{kT} \qquad (3.7)$$

Donde:
k = $1{,}38 \times 10^{-23}$ [JK^{-1}] (constante de Boltzman)
T - temperatura absoluta en Kélvines [K]
σ_i - sección transversal para ionización [m^2]
V_i - potencial de ionización [V]

Valores experimentales de A y B han sido determinados para algunos gases, apartándose de los valores teóricos esperados. A continuación en la tabla 3.1 se presentan algunos de estos valores, para las dependencias de los fenómenos de ionización y de recombinación con el campo y la presión, para el aire y el SF_6:

Tabla 3.1 Constantes A y B para el primer coeficiente Townsend

Gas	**A**	**B**	**Rango (E/p) [V/(cm·Torr)]**	**Fotones a 1 atm (γ)**
Aire	4,8	221,6	25-60	$3*10^{-3}$
	9,7	265	60-240	
	15	366	240-800	
SF_6	13,5	402	125-400	$8*10^{-6}$

Los valores de γ presentes en la tabla 1, corresponden a un valor promedio.

De acuerdo a la ecuación (3.3) para una determinada presión manteniendo el campo eléctrico constante, se tendría la siguiente dependencia:

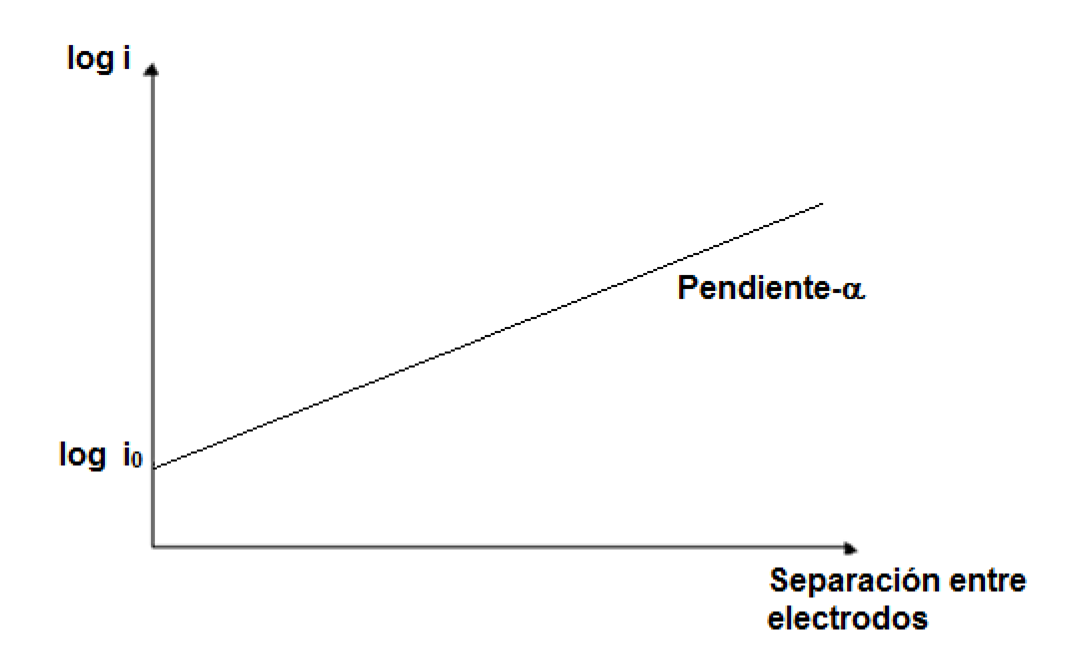


Figura 3.3 Característica estacionaria corriente-distancia entre placas. Modificado de [1] .

En este punto de las investigaciones Townsend observó que a tensiones más altas, la medición de la corriente entre las placas se incrementaba más rápidamente que lo que predecía la ecuación (3.1), como se observa a continuación:

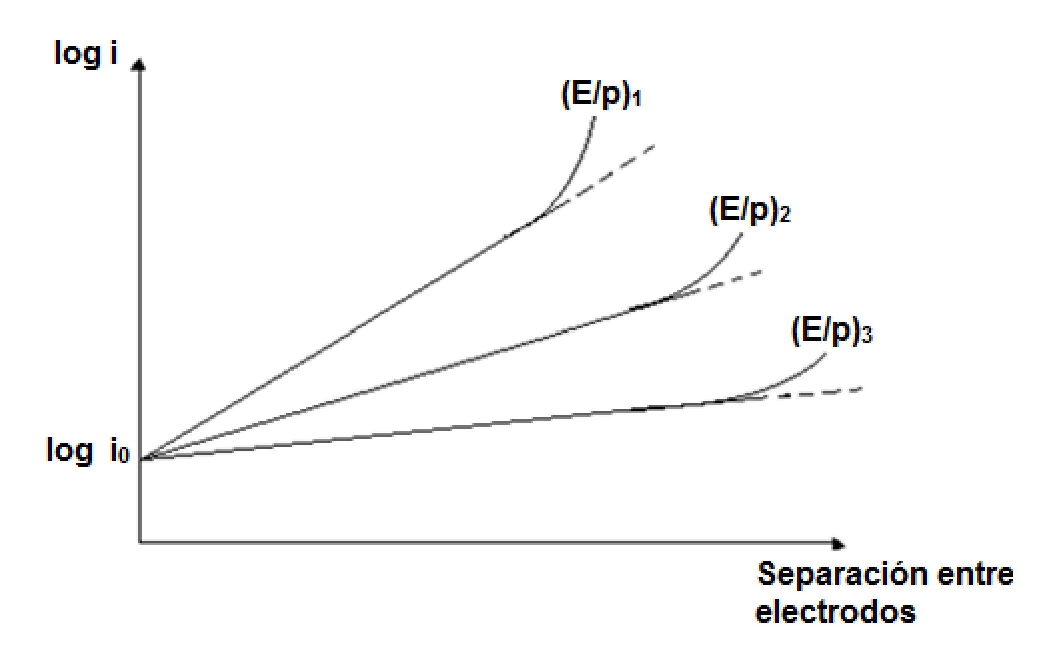


Figura 3.4. Característica estacionaria corriente-distancia entre placas. Modificado de [1] .

Donde:

$$(\boldsymbol{E}/\boldsymbol{p})_{\mathbf{1}} > (E/p)_{\mathbf{2}} > (\boldsymbol{E}/\boldsymbol{p})_{\mathbf{3}}$$

Para justificar el alejamiento de la linealidad, Townsend propuso que un segundo mecanismo que afectaría la corriente sería la explicación a este comportamiento. Inicialmente consideró la liberación de electrones en el gas por la colisión de iones positivos y posteriormente la liberación de estos del cátodo por el bombardeo de iones de acuerdo al primer mecanismo α. Se pueden incluir otros procesos por ejemplo la emisión secundaria de electrones en el cátodo por impacto de fotones y por la fotoionización del gas mismo. Todos estos fenómenos se cuantificaron a través del *segundo coeficiente de Townsend* γ .

Para la corriente la expresión (3.3) se convierte en:

$$\boldsymbol{i} = \frac{\boldsymbol{i_0 e^{\alpha d}}}{\mathbf{1} - \boldsymbol{\gamma}(\boldsymbol{e^{\gamma d}} - \mathbf{1})} \qquad (\mathbf{3.8})$$

Si la corriente i es muy grande, se tendrá una descarga autosostenida, aún si la corriente inicial i_o se desconecta, es decir que:

$$\boldsymbol{i} \rightarrow \infty$$

Cuando:

$$\mathbf{1} - \boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{\gamma d}} - \mathbf{1}\right) = \mathbf{0} \qquad (\mathbf{3.9})$$

A la expresión (3.9) se le conoce como criterio de chispa. Se considera que la descarga es no-autosostenida cuando:

$$\mathbf{1} - \boldsymbol{\gamma}\left(\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{\gamma d}} - \mathbf{1}\right) < 1 \qquad (\mathbf{3.10})$$

Cuando los gases son electronegativos se debe considerar la capacidad del gas para recombinar sus iones o para absorberlos. De esta manera se puede dar que en determinadas regiones se encuentren más electrones absorbidos que los producidos. El *coeficiente de recombinación o de absorción* η , caracteriza estos procesos a través de la siguiente relación:

$$\frac{\boldsymbol{n}}{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{f}\left(\frac{\boldsymbol{E}}{\boldsymbol{p}}\right) \qquad (\mathbf{3.11})$$

Gráficamente estos procesos se ilustran de la siguiente manera: $(E/p)_{crítico}$

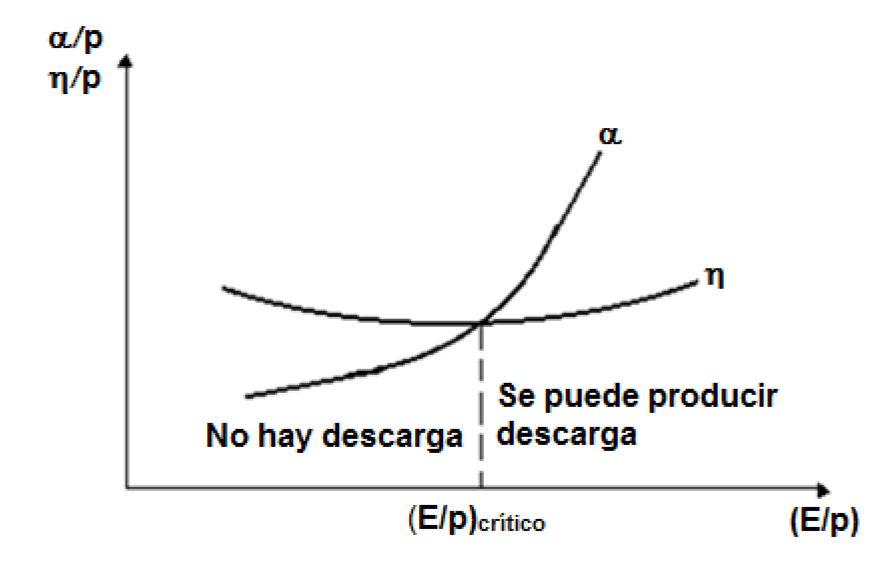


Figura 3.5. Proceso de recombinación para un gas electronegativo. Modificado de [1].

Para el aire existe la siguiente expresión (sin rango de aplicación) que involucra el proceso de recombinación:

$$\frac{n}{p} = 0{,}013 - 0{,}541 \times 10^{-3}\left(\frac{E}{p}\right) + 8{,}68 \times 10^{-6}\left(\frac{E}{p}\right)^2 \quad \left[\frac{V}{(cm \cdot Torr)}\right] \quad (3.12)$$

Para el SF_6 se tienen relaciones proporcionadas por diferentes investigaciones, que involucran el proceso de recombinación. Se presentan dos conjuntos:

- Primer conjunto (80 ≤ E/P ≤ 200):

$$\frac{n}{p} = 1{,}62 - 0{,}0059\left(\frac{E}{p}\right) \quad \left[\frac{V}{(cm \cdot Torr)}\right] \qquad (3.13)$$

Para este conjunto la relación (α/p) tiene la forma de la ecuación (3.5) y los valores de A y B se toman de la tabla 1.

- Segundo conjunto (sin rango de aplicación):

$$\frac{n}{p} = -0{,}004\left(\frac{E}{p}\right) + 1{,}524 \quad \left[\frac{V}{(cm \cdot Torr)}\right] \qquad (3.14)$$

Para este conjunto la relación (α/p) = f(E/p) es lineal, difiere de la dada por la ecuación (3.5), y tiene la siguiente forma:

$$\frac{\alpha}{p} = -0{,}004\left(\frac{E}{p}\right) + 1{,}524 \quad \left[\frac{V}{(cm \cdot Torr)}\right] \qquad (3.15)$$

Teniendo en cuenta los efectos primarios y los de recombinación se define el *coeficiente efectivo de ionización* $\overline{\alpha}$:

$$\overline{\alpha} = \alpha - \eta \qquad (3.16)$$

Por lo tanto la corriente se puede expresar para un gas electronegativo de acuerdo a:

$$i = \frac{i_0 e^{\overline{\alpha} d}}{1 - \gamma(e^{\overline{\alpha} d} - 1)} \qquad (3.17)$$

La fig. 3.6 muestra el comportamiento de un gas electronegativo de acuerdo a la teoría de descarga eléctrica de Townsend.

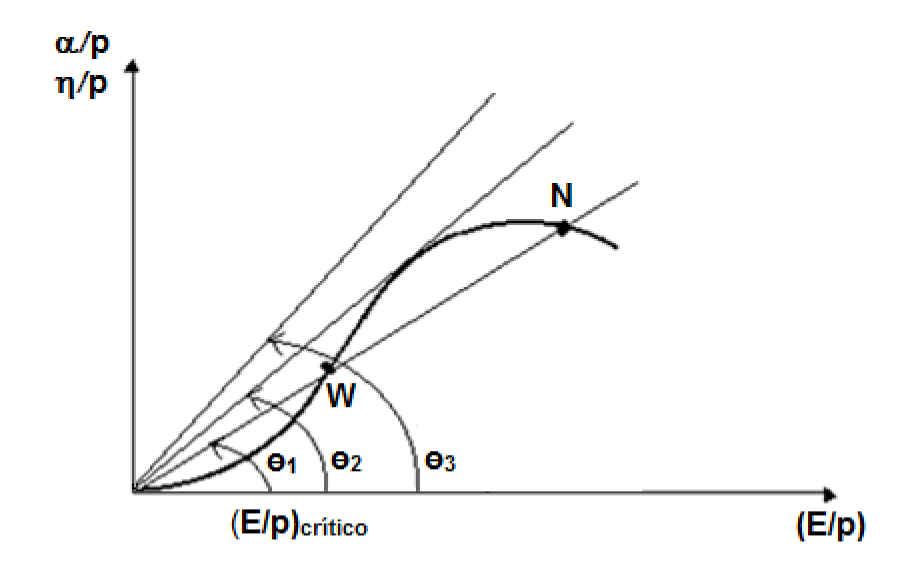


Figura 3.6 Comportamiento de un gas electronegativo. Tomado de [1].

Las rectas mostradas en la fig. 3.6 dependen de la tensión aplicada V, y están relacionadas con una pendiente que se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$tg\theta = \frac{\overline{\alpha}/p}{E/p} \qquad (3.18)$$

2.2 Ley de Paschen

Los fenómenos de disrupción en los gases también se describen a través de la ley de Paschen obtenida experimentalmente en 1889, en donde la tensión de chispa es una cantidad que depende del producto de la presión por la distancia entre electrodos:

$$V_b = f(pd) \qquad (3.19)$$

V_b es la tensión de chispa y analíticamente se puede expresar de acuerdo a:

$$V_b = \frac{B\,p\,d}{\ln\left(\frac{A\,p\,d}{\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \qquad (3.20)$$

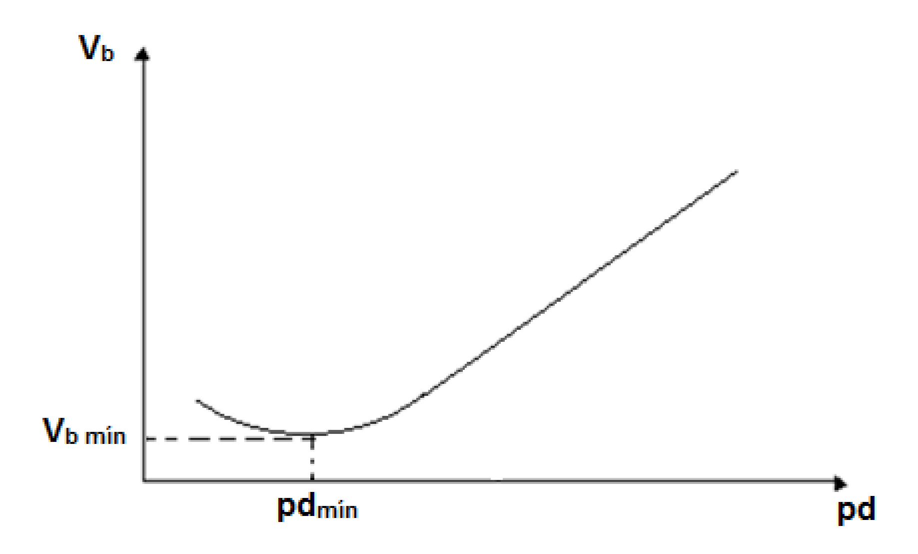


Figura 3.7 Relación entre la tensión de chispa y el producto (pd) según Paschen. Tomado de [1].

Con un valor de tensión relativamente alto existen dos valores para la ruptura en el gas. De igual manera existe un valor de (pd) para el cual se tiene el siguiente valor mínimo de tensión de ruptura:

$$V_{b_{mín}} = 2,718\,\frac{B}{A}\,ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right) \qquad (3.21)$$

A continuación en la tabla 3.2 se muestran valores medidos en la práctica, de las constantes de chispa ($V_{bmín}$ y $pd_{mín}$), para el aire y para el SF_6:

Tabla 3.2 Valores constantes mínimos para la ruptura dieléctrica en algunos gases

Gas	$V_{b\,mín}$ [V]	$pd_{mín}$ [Torr·cm]
N_2	240	0,65
Aire	325	0,55
SF_6	507	0,26

La ley de Paschen y la teoría de Townsend describen de manera diferente el comportamiento de las descargas eléctricas en gases.

3. <u>Procedimiento:</u>

3.1 Revisar la teoría de las descargas eléctricas en gases (Townsend y Paschen).

3.2 Encontrar el $(E/p)_{critico}$ para el aire y para el SF_6, en donde se pueda establecer que una descarga es autosostenida.

3.3 Para el aire construir la siguiente gráfica:

$$\left(\frac{\bar{\alpha}}{p}\right) = f\left(\frac{E}{p}\right)$$

Para el rango $25 \leq E/p \leq 800$. Evaluar el valor de θ_2.

3.4 Determinar el V_{bmin} para el aire y para el SF_6.

4. Bibliografía:

1. KUFFEL, E. y ZAENGL, W.S. High voltage engineering, fundamentals. 1 ed. London: Pergamon Press, 1984

2. EPRI. Transmission line reference book, 345 kV and above. 2 ed. Palo Alto, California: J. J. LaForest, 1982.

3. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

4. NAIDU, M. S., Kamaraju V. High voltage engineering. Ed Tata McGraw Hill.

5. Artículos especializados:

- Revista Electra. No 32. p.p 61-81

PRÁCTICA No. 4

PROCEDIMIENTOS DE CORRECCIÓN DE LA TENSIÓN DE CHISPA, $V_{50\%}$

1. Objetivos:

1.1 Revisar los procedimientos de corrección de la tensión de chispa por condiciones atmosféricas de acuerdo a la norma IEEE Std-4 de 1995.

1.2 Reconocer como se mide la temperatura, la presión y la humedad en condiciones de laboratorio.

1.3 Aplicar los procedimientos de corrección a ejemplos prácticos.

2. Marco teórico:

La tensión de chispa de un aislamiento externo depende de factores tales como la densidad del aire y la humedad (condiciones atmosféricas), así como de la lluvia y la contaminación.

Para campos uniformes y con pequeñas separaciones entre electrodos la tensión de descarga sigue la Ley de Paschen:

$$\boldsymbol{V = f(pd)} \qquad (\mathbf{4.1})$$

Siendo ***p*** la presión y ***d*** la distancia entre electrodos. Para Paschen la tensión de descarga en un campo uniforme es solamente función del producto de la presión y de la separación interelectródica para un gas en particular y un material dado de los electrodos.

Con investigaciones posteriores se estableció que la tensión de flameo para una configuración con aislamiento de aire, se incrementa por el aumento de la humedad y/o de la densidad del aire. La densidad del aire reduce la trayectoria libre media de los electrones (cargas), en tanto que la humedad reduce su movilidad al ser capturados por las moléculas de agua.

Las tensiones de chispa debidas a impulsos de tensión son directamente proporcionales a la densidad del aire y por lo tanto, a la presión atmosférica, dentro de los límites prácticos de estas últimas, cualquiera que sea la forma del campo.

Las normas IEC 60-01 ó la IEEE Std. 4-1995 y su adición la IEEE Std. 4a-2001, recomiendan dos procedimientos de corrección que involucran los siguientes factores:

- Factor de corrección por densidad del aire ($\boldsymbol{k_1}$).
- Factor de corrección por humedad ($\boldsymbol{k_2}$).

El primer procedimiento se utiliza para separaciones entre electrodos por encima de un metro (1 m), en tanto que el segundo aplica a aquellas configuraciones donde las separaciones alcancen hasta un metro (1 m) de separación.

A continuación se describe el primero de los dos procedimientos[3]:

Factor de corrección por densidad del aire ($\boldsymbol{k_1}$):

La densidad del aire proporciona un parámetro básico para la coordinación del aislamiento en muchas instalaciones prácticas sometidas a altas tensiones. Ya que la presión y la temperatura varían considerablemente de lugar en lugar y de tiempo en tiempo, las características en la tensión de chispa para diferentes aparatos serán relativamente afectadas por estos parámetros. Antes de definir el factor $\boldsymbol{k_1}$, es importante identificar las condiciones estandarizadas que de acuerdo a la norma IEEE Std 4-1995 son:

Tabla 4.1 Condiciones atmosféricas normalizadas

Condición atmosférica	**Representación**	**Valor**
Temperatura, °C	t_0	20
Presión, kPa	p_o	101,3
Presión, mm-Hg	p_o	760
Humedad absoluta, g/m^3	h_o	11

El factor de corrección por densidad del aire se define así:

$$\boldsymbol{k_1 = \delta^m} \qquad (4.2)$$

[3] El segundo procedimiento (hasta 1 m de separación entre electrodos) se puede revisar en las págs. 30 a 33 de la ref. 3.

$$\boldsymbol{\delta} = \left(\frac{\boldsymbol{p}}{\boldsymbol{p_0}}\right)\left(\frac{\mathbf{273} + \boldsymbol{t_o}}{\mathbf{273} + \boldsymbol{t}}\right) \qquad (4.3)$$

Donde:
δ - densidad relativa del aire
p - presión a condiciones de laboratorio [mm-Hg]
p_0 - presión normalizada (ver tabla 4.1) [mm-Hg]
t - temperatura a condiciones de laboratorio [ºC]
t_0 - temperatura normalizada (ver tabla 4.1) [ºC]
m - coeficiente que será especificado más adelante.

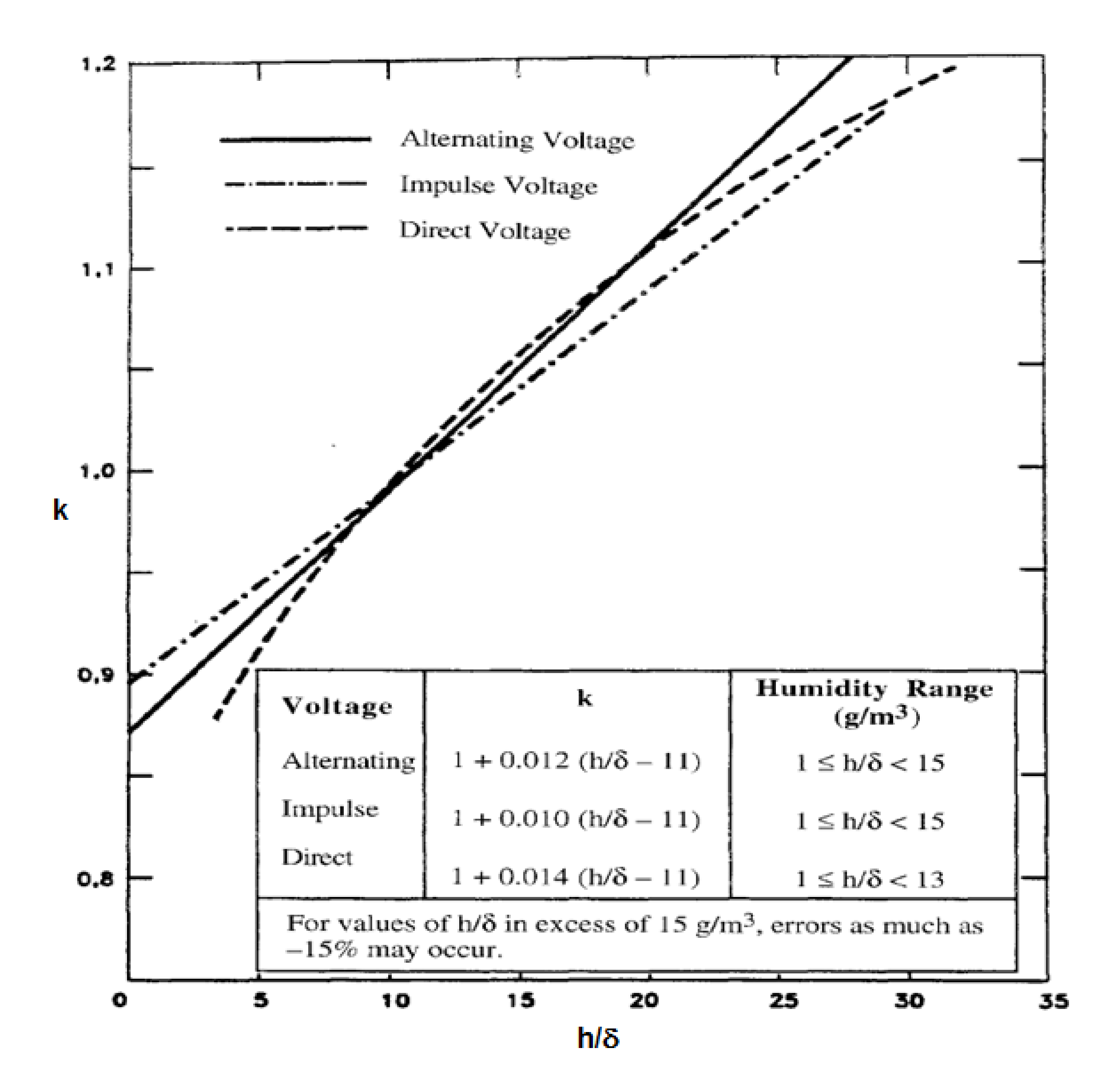
Factor de corrección por humedad (*k_2*):

Este factor se utiliza para corregir una tensión de ruptura a cualquier humedad h, a su valor normalizado correspondiente de 11 g/m^3, asumiendo una densidad del aire constante en cada caso, entonces:

$$\boldsymbol{k_2} = \boldsymbol{k^w} \qquad (4.4)$$

El parámetro ***k*** depende del tipo de tensión aplicada en la prueba, y para propósitos prácticos, puede ser obtenido aproximadamente como función de la relación entre la humedad absoluta (h) y la densidad relativa del aire (δ), usando las curvas de la fig. 4.1. El factor ***w*** es un coeficiente que será especificado más adelante

De acuerdo a datos experimentales, se ha establecido que la carga espacial neta formada por el primer streamer corona se reduce al incrementarse la humedad. Además también se ha establecido que al aumentar la humedad, el $V_{50\%}$ aumenta, debido a que la alta afinidad electrónica de las moléculas de agua conduce a un incremento del coeficiente de recombinación (relación entre los electrones libres capturados por las moléculas neutras y los producidos por colisiones) y a una disminución de la rapidez de ionización; necesitándose un campo eléctrico más alto para el inicio de la descarga. El uso de la humedad equivalente h/δ, tiene en cuenta la influencia de la densidad del aire en la variación de la $V_{50\%}$, especialmente cuando se hacen mediciones a grandes altitudes.



Voltage	k	Humidity Range (g/m³)
Alternating	1 + 0.012 (h/δ – 11)	1 ≤ h/δ < 15
Impulse	1 + 0.010 (h/δ – 11)	1 ≤ h/δ < 15
Direct	1 + 0.014 (h/δ – 11)	1 ≤ h/δ < 13

For values of h/δ in excess of 15 g/m³, errors as much as –15% may occur.

Figura 4.1 Parámetro ***k*** en función de h / δ. Tomado de [1].

Se ha establecido que para tensiones de tipo impulso (fig. 4.1), la constante ***k*** se puede expresar en términos de la densidad relativa **h/δ,** de acuerdo a:

$$\boldsymbol{k = 1 + 0,01\left[\frac{h}{\delta} - 11\right]} \qquad (4.5)$$

En donde según la norma IEEE Std 4-1995, para valores de h/δ por encima de 15 g/m3, las correcciones por humedad todavía están bajo consideración, y se pueden presentar errores hasta de –15%.

El cálculo de la humedad absoluta h se efectúa de acuerdo con:

$$\boldsymbol{h} = \left(\boldsymbol{CV_{H_2O}}\right)\left(\frac{\boldsymbol{h_r}\%}{\boldsymbol{100}}\right) \qquad (4.6)$$

Con CV_{H2O} como el contenido de vapor de agua del aire saturado en g/m^3.

Tabla 4.2 Contenido de vapor de agua del aire saturado para algunas temperaturas

Temperatura [ºC]	Vapor de agua [g/m^3]
-10	2,10
0	4,80
10	9,40
20	17,33
21	17,70
22	19,00
23	20,00
24	21,30
25	22,67
26	23,67
27	25,00
28	26,67
29	28,33
30	30,33
31	31,67
32	32,67

El procedimiento de corrección está basado en un modelo semifísico con una aplicabilidad general. La tensión de chispa a condiciones de laboratorio, en función de la tensión de chispa a condiciones normalizadas es:

$$\boldsymbol{V_{50\%}} = (\boldsymbol{V_{50\%}})_{\boldsymbol{o}}\, \boldsymbol{k_1 k_2} \qquad (4.7)$$

Donde:
$(V_{50\%})_o$ - tensión de chispa a condiciones normalizadas o estándar [kV]
k_1 - factor de corrección por densidad del aire
k_2 - factor de corrección por humedad

De esta forma se puede obtener la tensión normalizada, teniendo la tensión a condiciones de laboratorio:

$$(\boldsymbol{V_{50\%}})_{\boldsymbol{o}} = \frac{\boldsymbol{V_{50\%}}}{\boldsymbol{k_1 k_2}} \qquad (4.8)$$

Exponentes m y w

Los exponentes ***m*** y ***w*** que corresponden a los factores de corrección atmosférica, dependen del tipo de predescarga, esto se tiene en cuenta a través del parámetro adimensional ***g***.

$$\boldsymbol{g = \frac{V_B}{500\,L\,\delta\,k} = \frac{(V_B)_o}{500L}} \qquad (4.9)$$

Donde:
V_B - Tensión de descarga disruptiva del 50% (medido o estimado) a las condiciones atmosféricas actuales (en los casos que no se pueda estimar se asume 1,1 veces la tensión de prueba) [kV]
L - distancia mínima de descarga [m]
k - parámetro que depende del tipo de tensión de prueba (fig. 4.1)
δ - densidad relativa del aire
$(V_B)_o$ – Tensión de descarga disruptiva del 50% a condiciones estandarizadas

Los valores de los exponentes ***m*** y ***w***, dependen únicamente de ***g*** independientemente de la configuración electródica, de la separación interelectródica y de la naturaleza del impulso.

Los valores de ***m*** y ***w*** se pueden encontrar por medio de la fig. 4.2 ó de acuerdo a las siguientes expresiones:

Tabla 4.3 Valores de ***m*** y ***w*** en función del parámetro g

Exponente	Valor	Rango
m = w	$\frac{g(g-0,2)}{0,8}$	$g \leq 0,97$
m	1	$g > 0,97$
w	1	$0,97 < g \leq 1,23$
w	$\frac{(2-g)}{0,66g}$	$1,23 < g < 2$
w	0	$g \geq 2$

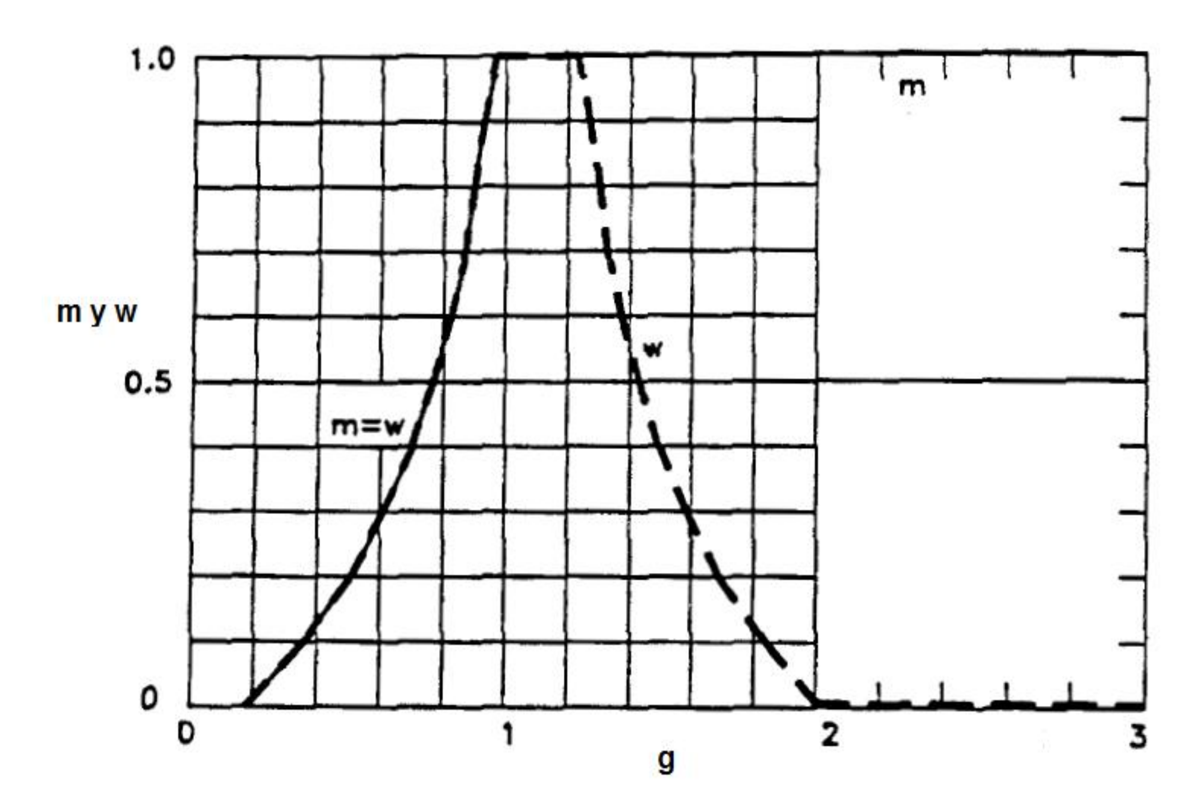


Figura 4.2 Valores de los exponentes ***m*** y ***w*** en función del parámetro ***g***. Tomado de [1].

Nota: En la normatividad colombiana todavía no existe un criterio único para la corrección por condiciones atmosféricas de la tensión de chispa. Por ejemplo la norma NTC-1285 (segunda revisión) exige un procedimiento de corrección acorde con la norma ANSI C68-1(pág.8 y siguientes) que difiere en varios aspectos con lo establecido en los procedimientos IEC o IEEE.

3. Procedimiento:

3.1 Analizar detalladamente cada uno de los procedimientos existentes para la corrección de la $V_{50\%}$ por condiciones atmosféricas.

3.2 Medir la humedad relativa del aire en la sala de ensayos del laboratorio de Alta Tensión de la UIS y calcular la humedad absoluta.

3.3 Calcular la humedad absoluta del aire empleando el procedimiento propuesto en la ref. 7, a partir de las mediciones aportadas por los termómetros del sicrómetro.

$$\boldsymbol{h = P_h\left(\frac{288,8}{273,7 + t}\right)} \qquad (4.10)$$

Donde:
t - temperatura [°C]
P_h - presión del vapor [mm-Hg]

$$P_h = P_s - 0,66 * 10^{-3} P(t - t')(1 + 1,15 * 10^{-3} t) \quad (4.11)$$

t' - temperatura del bulbo húmedo [°C]
P_s - presión del vapor de H_2O saturada a t' [mm-Hg]
P - presión barométrica [mm-Hg]
t - temperatura ambiente del bulbo seco [°C]

3.4 Corregir los diferentes valores de tensiones de chispa para los ejemplos proporcionados.

4. Bibliografía:

1. IEEE Std. 4-1995. IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. New York. 1995.

2. IEEE Std. 4a-2001. Amendment to IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. New York. 2001.

3. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

4. ROTH, Arnold. Técnica de la alta tensión. Barcelona: Editorial Labor, 1966.

5. CASTELLANOS ZAMBRANO, Henry Dalid. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta-punta y punta-placa. Tesis de Maestría en Potencia Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Mecánicas, 2002.

6. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para aisladores de potencia eléctrica. NTC 1285. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.

7. KUFFEL, E. y ZAENGL, W.S. High voltage engineering, fundamentals. 1 ed. London: Pergamon Press, 1984

8. HILEMAN, A. R. Insulation coordination for power systems. Taylor and Francis Group, 1999.

PRÁCTICA No. 5

EFECTO CORONA EN LOS CONDUCTORES. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS.

1. Objetivos:

1.1 Evaluar los pulsos corona y confrontar el inicio de los mismos con el criterio de Peek.

1.2 Evaluar el efecto corona en conductores. Obtener las pérdidas de potencia en [W/m], para una línea de transmisión utilizando los resultados obtenidos para una configuración coaxial.

2. Marco teórico:

El nivel de tensión al cual se energiza una línea aérea para la transmisión de energía eléctrica conlleva la producción de ciertos efectos colaterales, especialmente cuando este nivel sobrepasa ciertos valores.

Al energizar una línea se generan gradientes de potencial (intensidades de campo eléctrico) en su superficie los cuales al sobrepasar cierto valor crítico producen la ionización del aire circundante, fenómeno al cual se le conoce con el nombre genérico de efecto corona.

Los fenómenos físicos que conducen al efecto corona fueron estudiados especialmente por Loeb, utilizando configuraciones de electrodos creadores de campos altamente no homogéneos. La aplicación de estos estudios a las líneas de transmisión ha proseguido una metodología muy de acuerdo con el desarrollo tecnológico e industrial de cada país, al mismo tiempo orientada hacia los efectos a estudiar. Inicialmente se construyeron tramos pequeños de líneas, cuyas dimensiones permitían su montaje dentro de los laboratorios, lo cual condujo al sistema de mallas o jaulas y el cual es aún utilizado ampliamente cuando existen limitaciones de planta física, o de equipo, o se desea controlar perfectamente las condiciones bajo las cuales se va a desarrollar la práctica, es decir:

- Condiciones ambientales
- Condiciones de captación de la información

Con estos modelos se estudiaron los efectos asociados con la presencia de corona en las líneas, a saber:

- Pérdidas de energía activa.
- Ruido audible.
- Radio-Interferencia.
- T.V.-Interferencia.
- Oxidación de los cables.
- Contaminación por generación de ozono y óxidos de nitrógeno (NO_x).

El montaje de la fig. 5.1 permite realizar cálculos con medidas previamente evaluadas relacionadas con los efectos asociados a la presencia de corona, como obtener la tensión de generación de ruido audible y la tensión de generación de corona visible.

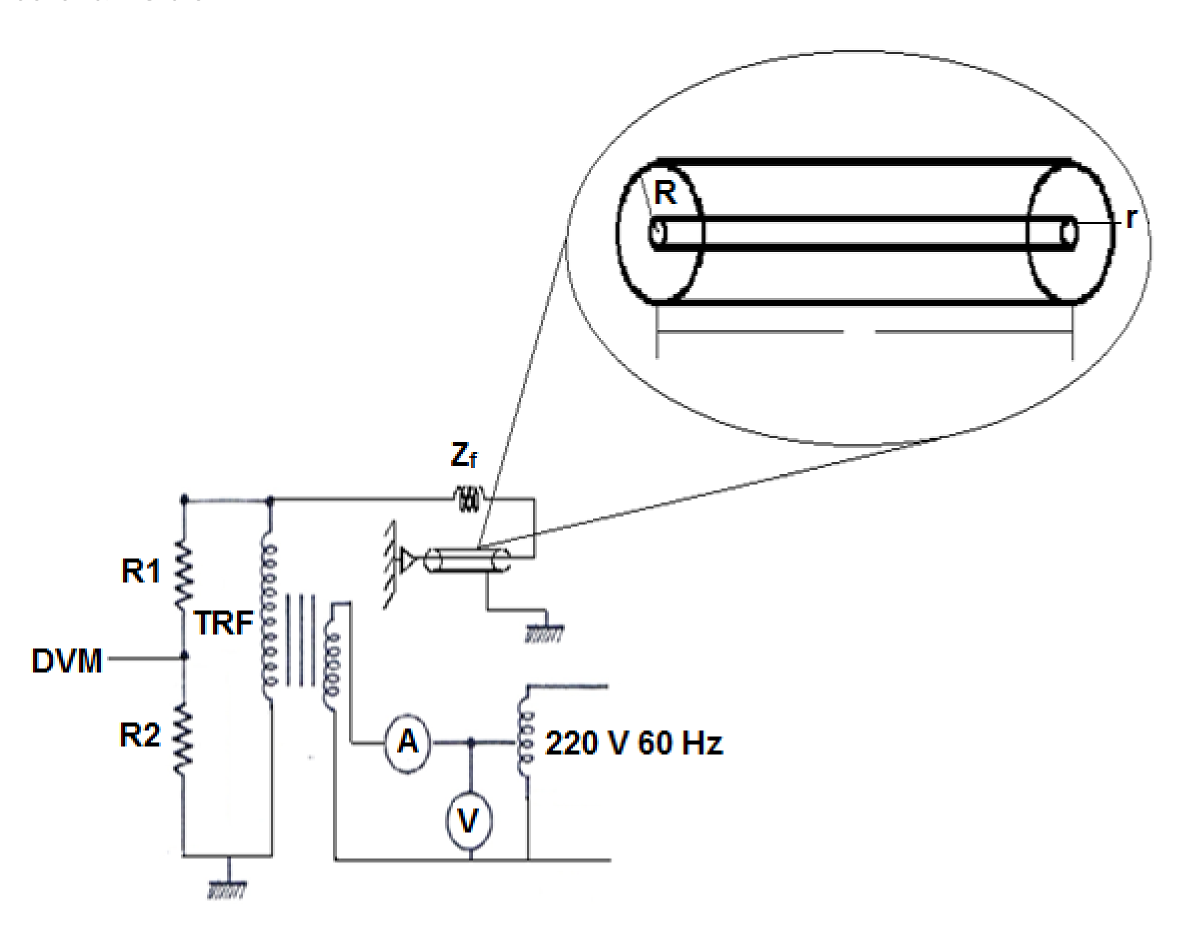


Figura 5.1 Montaje para la aparición de los pulsos corona. Tomado de [3].

r = 1,26 cm (radio del conductor)
R = 50 cm (radio de la malla)
L = 1,50 m (longitud del conductor)

Gradiente crítico (Peek)

El gradiente superficial necesario para alcanzar el umbral corona en el gas que rodea un conductor cilíndrico liso, se denomina gradiente crítico visual o gradiente de iniciación, E_o. Alcanzar el nivel E_o en la superficie del conductor, significa que en una determinada distancia de dicha superficie, se ha alcanzado el nivel de ruptura necesario para desencadenar el proceso de descargas y el inicio de las manifestaciones luminosas. F. W. Peek provee unas expresiones para obtener el gradiente crítico para la producción de corona:

$$E_0 = 31\, m\, \delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta\, r}}\right) \qquad (5.1)$$

$$E_0 = 30\, m\, \delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta\, r}}\right) \qquad (5.2)$$

Donde:
m - factor de rugosidad
δ - densidad relativa del aire
r - radio del conductor [cm]

La expresión (5.1) se utiliza en una configuración de cilindros coaxiales, mientras que la (5.2) se utiliza para una configuración de cilindros paralelos.

- **Métodos para determinar las pérdidas corona**

A. Método EPRI (Factor electrogeométrico k)

Las pérdidas efectivas por corona para la línea de transmisión se obtienen de acuerdo a:

$$P_{LÍNEA} = k\, P_{red} \qquad (5.3)$$

Las pérdidas reducidas se encuentran utilizando expresiones experimentales.

Para encontrar el factor electrogeométrico **k**, una línea de transmisión se lleva al equivalente de una configuración coaxial (semejante a la configuración enmallada del laboratorio, teniendo en cuenta el r_{eq} de su conductor coaxial) y se utiliza la siguiente expresión:

$$k = \frac{\ln \frac{R_1}{r_{eq}}}{\ln \frac{R_1}{\rho}} \qquad (5.4)$$

Donde:
r_{eq} - radio equivalente del haz [cm] (radio de un conductor sencillo con la misma capacitancia)
ρ - radio corona [cm] (distancia promedio equivalente entre la carga espacial producido por el efecto corona y el centro del haz)
R_1 - radio de la jaula equivalente [cm] (radio de un coaxial aterrizado que tenga la misma capacitancia)

El radio corona se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{\rho = \sqrt{270\, n\, r + \left(\frac{D}{2}\right)^2}} \qquad (5.5)$$

Donde:
D - separación entre subconductores [cm]
n - número de subconductores del haz
r - radio del conductor [cm]
Si n = 1 ⇒ $\rho = 16{,}43\sqrt{r}$ [cm]

Para determinar el radio R_1 se determina la capacitancia por fase C_φ, para la línea completamente transpuesta y se iguala a:

$$\boldsymbol{C_\varphi = \frac{2\pi\epsilon_0}{ln\left(\frac{R_1}{r}\right)}} \qquad (5.6)$$

Para un conductor Flint (r = 1,26 cm) en condiciones ambientales de buen clima (sin lluvia), con el campo eléctrico en kV/cm.

Las pérdidas reducidas P_{red} corresponden a:

$$\boldsymbol{P_{red} = 0{,}1784(E - 13{,}77)^2 - 0{,}2128} \qquad (5.7)$$

B. Método de Petersen

Dentro de los muchos métodos analíticos descritos en la literatura para evaluar las pérdidas corona, Petersen propuso un método analítico convencional que permite calcular las pérdidas por efecto corona para una línea de transmisión utilizando las siguientes expresiones:

$$P_c = \frac{111,13 \cdot 10^{-6}\ f\ V_f^2\ F}{\left[ln\ \left(\frac{DMG}{r}\right)\right]^2} \qquad (5.8)$$

Donde:
f - frecuencia del sistema [Hz]
V_f - tensión eficaz entre fase y neutro [kV_{rms}]
F - factor corona que depende de la relación entre V_f y V_o
DMG - distancia media geométrica [cm]
r – radio [cm]

Tabla 5.1 Valor del coeficiente F en función de la relación V/V_0

V_f / V_o	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,5
F	0,0011	0,014	0,018	0,025	0,036	0,053	0,085	0,15	0,95

V_o - tensión crítica de corona [kV_{rms}]

$$V_0 = g_0\, r\ \ln\left(\frac{DMG}{r}\right) \qquad (5.9)$$

$$g_0 = 21,21\ m_s\, m_f(1 - 0,07\ r)\delta^{2/3} \qquad (5.10)$$

m_s - factor de corrección por el estado de la superficie del conductor
m_f - factor de forma del conductor
δ - densidad relativa del aire

Tabla 5.2 Factor de corrección por el estado de la superficie del conductor

m_s	Estado de la superficie del conductor
0,9	Envejecida
0,8	Nueva
0,3 – 0,5	Húmeda
0,7	Sucia ó engrasada
1	Limpia ó lisa

Tabla 5.3 Factor de forma del conductor

m_f	Forma del conductor
1	Perfectamente circular
0,9	Con 12 a 30 hilos en la capa externa
0,85	Con 6 hilos en capa externa

3. **Procedimiento:**

3.1 De acuerdo al montaje indicado en la fig. 5.1, aplicar tensión hasta observar la aparición de pulsos corona.

Comprobar que los pulsos corona no aparecen antes de $0,5E_o$ para clima seco (sin lluvia) y $0,3E_o$ para clima con lluvia, en donde E_o es el gradiente crítico de Peek corregido para valores rms, con ***m*** promedio para cables ACSR y δ (densidad relativa del aire), aproximadamente igual a la utilizada en la práctica No. 4.

3.2 Para el conductor dado establecer las pérdidas reducidas P_{red} para los campos asociados a las tensiones aplicadas en la tabla 5.4.

3.3 Evaluar las pérdidas corona para el campo asociado a la tensión nominal de una línea de transmisión real, utilizando el factor electrogeométrico (metodología EPRI).

3.4 Calcular las pérdidas corona para el campo asociado a la tensión nominal de la línea de transmisión utilizada en el numeral anterior, utilizando el método Petersen, y comparar los resultados obtenidos con los del numeral 3.3.

Nota: Utilizar como criterio de igualdad el gradiente de potencial (E) y no la tensión, es decir para la tensión nominal de la línea encontrar el $E_{máx}$ correspondiente.

4. **Equipo utilizado:**

- Divisor de tensión óhmico.
  R_1 = 300 MΩ ± 10%
  R_2 = 350 kΩ ± 2%
  Relación calibrada 1055/1

- Transformador elevador de corriente alterna.
  Tipo tanque
  Marca Foster
  Tensión primaria 0 – 500 V
  Tensión secundaria 0 – 300 kV
  Potencia 20 kVA
  Corriente primaria máxima 40 A
  Corriente secundaria máxima 67 mA

- Osciloscopio.
  Tipo digital
  Osciloscopio Fluke

- Amperímetro de hierro móvil.
  Escala 0 – 48 A
  Conectado a través de transformador de corriente de relación nominal 8/1

Tabla 5.4

V [kV]	**V_L [kV]**	**E [kV/cm]**	**P_{red} [W/m]**	**P_c [W/m] (EPRI)**	**P_c [W/m] (Petersen)**	**Observaciones**
60						
70						
80						
90						
100						

5. Bibliografía:

1. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

2. EPRI. Transmission line reference book, 345 kV and above. 2 ed. Palo Alto, California: J. J. LaForest, 1982.

3. RUGELES, Julio. Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1995.

4. ROTH, Arnold. Técnica de la alta tensión. Barcelona: Editorial Labor, 1966.BEGAMUDRE, Rakosh D. Extra high voltage A.C. transmission engineering. ___. New York: John Wiley, 1986.

5. BEGAMUDRE, Rakosh D. Extra high voltage A.C. transmission engineering. ___. New York: John Wiley, 1986.

PRÁCTICA No. 6

DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE RUPTURA DIELÉCTRICA EN ACEITES AISLANTES

1. Objetivos:

1.1 Analizar los métodos de ensayo propuestos en las normas NTC 2975 y NTC 3218, para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en un aceite aislante.

1.2 Ejecutar un ensayo sobre una muestra de aceite dieléctrico de acuerdo a la norma NTC 2975.

2. Marco teórico:

Se ha comprobado que las propiedades eléctricas de los aparatos que trabajan sumergidos en aceite descienden siempre en servicio a lo largo del tiempo. La causa principal reside en la humedad que el aceite absorbe del aire. Esta humedad se incorpora gracias al proceso de respiración de los transformadores, es decir, por efecto de las dilataciones y contracciones térmicas sucesivas del aceite, que provienen de las variaciones de carga o de la temperatura exterior. Tal efecto se hace perceptible, con aceite por lo demás inalterado, ante la presencia de las más insignificantes cantidades de agua, y se hace extraordinario si la humedad incorporada llega a ser notable, o cuando el aceite presenta ya un cierto grado de envejecimiento o de acidez, así como en el caso de que contenga elementos sólidos en suspensión, polvo, partículas metálicas o aislantes, lo cual ocurre con frecuencia en los transformadores.

La medición de la tensión de ruptura dieléctrica no es en sí un examen de la calidad del aceite, sino una prueba convencional tendiente a detectar la presencia de agua o de otras impurezas en él. Con base en los resultados se puede decidir sobre la oportunidad de seguir un tratamiento de secado y filtrado antes de verterlo a la cuba del transformador.

La Norma NTC recomienda para la determinación de la tensión de ruptura dieléctrica seguir la metodología especificada en las Normas NTC 2975 (ASTM D-877-87) o por la especificada en la Norma NTC 3218 (IEC 156 ó ASTM D-1816-84a). Los parámetros más importantes que se consideran en estas normas son los siguientes:

- **Alcance:** determinar la tensión de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes. Estos procedimientos se aplican a aceites derivados del petróleo, hidrocarburos, askareles (usados como medios aislantes y refrigerantes) y

líquidos de uso común en equipos en los que el aceite es un medio aislante y refrigerante.

- **Fuente de alta tensión:** se recomienda un transformador elevador conectado a una fuente de baja tensión variable a frecuencia comercial, para obtener la tensión de ensayo requerida.

- **Corrientes de cortocircuito:** el dispositivo de interrupción automática debe actuar cuando la corriente a través del circuito de la muestra, se encuentre entre ciertos valores específicos.

- **Rata de crecimiento de la tensión:** se recomienda utilizar un equipo con una curva característica tensión-tiempo aproximadamente lineal en el intervalo deseado de operación y accionado por un motor, con el fin de lograr manualmente un incremento uniforme de la tensión.

- **Tipo de electrodos:** su forma, material y separación dependen de la metodología empleada, además deben cuidarse y ajustarse al comienzo de cada sesión de ensayos.

- **Tipo de probeta:** su forma, tamaño y material dependen de la metodología empleada. Deben ser recipientes con los electrodos rígidamente montados y se deben construir de manera que se cumplan ciertas distancias mínimas entre sus partes.

- **Toma de muestras:** para obtener una muestra del aceite o del liquido que se va a ensayar, se usa un aparato de muestreo apropiado, que corresponda a los métodos indicados en la Norma ASTM D-923. La muestra se debe tomar en una botella seca y limpia sellada herméticamente y cubierta para protegerla de la luz, hasta cuando esté lista para ensayarse.

- **Procedimiento:** después de identificar todos los factores necesarios para realizar el ensayo, se llevan a cabo una serie de pasos para determinar la tensión de ruptura dieléctrica.

- **Reporte:** documento organizado que contenga la información y los datos requeridos según la norma empleada.

3. <u>Procedimiento:</u>

3.1 Con base en cada norma (NTC 2975 y NTC 3218), analizar las siguientes variables:

- Alcance
- Fuente de alta tensión
- Corrientes de cortocircuito
- Rata de crecimiento de la tensión
- Tipo de electrodos
- Tipo de probeta
- Obtención de la muestra
- Aceite en reposo o con circulación forzada
- Procedimiento
- Análisis de los resultados
- Reporte

3.2 Realizar los ensayos para evaluar la tensión de ruptura dieléctrica de un aceite aislante de acuerdo con el procedimiento establecido en las normas NTC 2975 (ASTM D-877-87).

Los datos obtenidos en cada ensayo se deben consignar en la hoja de registro de datos.

3.3 Hacer el reporte según lo especificado en cada norma.

4. Equipo utilizado:

El equipo a utilizar en estos ensayos es el siguiente:

- Chispómetro marca SIEMENS
- Tensión Primario: 0..216 V
- Tensión Secundaria: 0..60 kV
- Voltímetro análogo:
  - Escala roja indica kV_{rms}, basado en relación de transformación del transformador.
  - Escala negra: indica campo eléctrico en kV_{rms}/cm, calibrado para una distancia de 2,5 mm con electrodos tipo hongo.

REGISTRO DE DATOS

MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DISRUPTIVA					
Realizó		**Revisó**		**Fecha**	
Muestra No		**Color**			
Temperatura		**Viscosidad**			
Tipo de probeta	ASTM D-877:		ASTM D-1816:		
Separación entre electrodos	mm:				
Rata de crecimiento de la tensión	3 kV/s:		0,5 kV/s:		

Prueba No.	**Lectura V [kV]**	**Lectura E [kV/cm]**	**Observaciones**
Promedio			

Consistencia estadística:
A = mayor valor   B = menor valor
3(A-B) < valor siguiente a B
Nota: la primera aplicación de la tensión se ignora

5. Bibliografía

1. ROTH Arnold. Técnica de la alta tensión. Barcelona: Editorial Labor, 1966.

2. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia: Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en líquidos aislantes utilizando electrodos de disco. NTC 2975. Bogotá D.C.: El Instituto, 1991.

3. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia: Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en aceites aislantes derivados del petróleo usando electrodos del tipo VDE. NTC 3218. Bogotá D.C.: El Instituto, 1991.

4. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

PRÁCTICA No. 7

OBTENCIÓN DE FORMAS DE ONDA NORMALIZADAS

1. Objetivos:

1.1 Ajustar las componentes del generador de ondas de impulso de tensión con el fin de obtener las formas de onda normalizadas tipo impulso atmosférico (IA) y tipo impulso maniobra (IM).

1.2 Analizar los circuitos equivalentes del generador de ondas de impulso de tensión para comparar la respuesta teórica con la obtenida en el laboratorio.

2. Marco teórico:

Impulsos de Tensión

El equipo eléctrico (sistemas eléctricos de potencia, transmisión o distribución) durante su vida operacional tiene que soportar sobretensiones causadas por descargas atmosféricas o por maniobras, cuyos picos, generalmente, exceden las amplitudes operativas de las tensiones AC. Se hace necesario generar tipos de onda de prueba para investigar la capacidad para soportar estas sobretensiones. Las pruebas no pretenden reproducir exactamente las condiciones reales de operación, pero proporcionan un criterio basado en la experiencia que permite esperar un servicio satisfactorio de explotación. Actualmente las formas de onda de los dos tipos de sobretensiones varían fuertemente.

Los estándares internacionales definen un IMPULSO DE TENSIÓN como una tensión unidireccional que crece más o menos rápidamente hasta un valor máximo y luego decrece relativamente despacio hasta llegar a cero.

Los parámetros que definen una onda de impulso son los siguientes:

- Polaridad
- Valor de cresta (máximo)
- Duración del frente (que precede a la cresta) T_1
- Duración de la cola hasta el hemivalor T_2

Se dice que una onda de tensión de impulso es plena cuando no es interrumpida (cortada) por una descarga, contorneo o perforación. La onda cortada puede serlo en el frente, en la cresta, o en la cola, y a partir del instante de corte la tensión cae bruscamente. Se distinguen dependiendo de su origen dos tipos de impulsos:

- Atmosférico (tipo rayo), IA.
- Maniobra (tipo switcheo), IM.

El primer tipo de sobretensiones son las originadas por descargas atmosféricas (DEAT), que alcanzan a los conductores de las líneas de alta tensión o a las partes vivas de las subestaciones. El segundo tipo de sobretensión es causado por las maniobras efectuadas sobre los sistemas de distribución como apertura o cierre de líneas, energización de equipos, etc.

Impulso atmosférico

Es un impulso de tensión con tiempos de frente que varían desde un microsegundo hasta algunas decimas de microsegundos. En la fig. 7.1 se representa la forma típica de una onda de tensión del tipo impulso atmosférico, así como las correspondientes a la misma tensión pero recortadas en el frente o en la cola, recortes debidos por ejemplo a una descarga disruptiva o flameo.

El origen virtual O_1 se define como el punto en donde la línea AB corte el eje del tiempo. Para las ondas cuyo recorte ocurre en el frente o en la cola, el tiempo equivalente es T_C y se conoce como el tiempo al recorte.

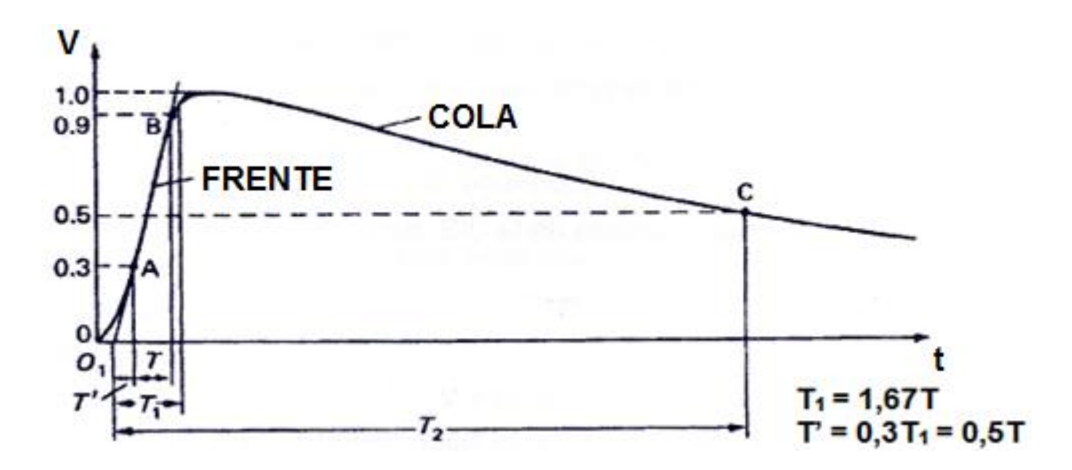


Figura 7.1 Onda de impulso atmosférico normalizada. Tomado de [1].

Una onda de impulso atmosférico recortada es aquella que se interrumpe bruscamente por una descarga disruptiva provocando una brusca caída de tensión, prácticamente a cero como se indica en la fig. 7.2 y fig. 7.3.

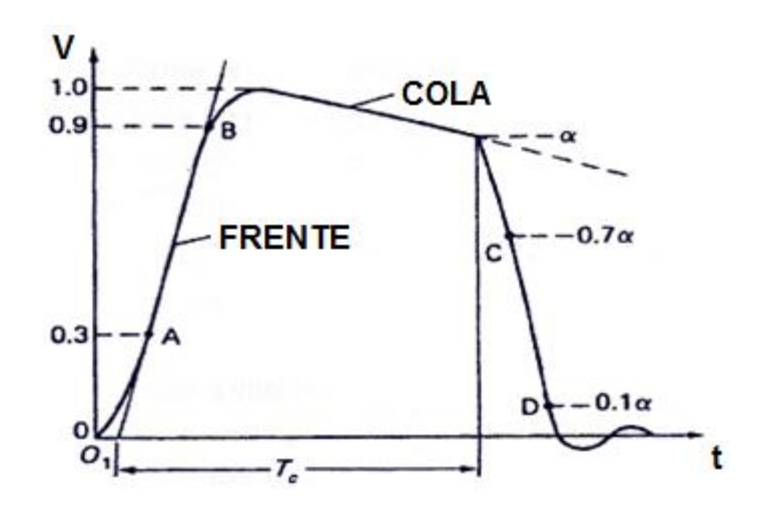


Figura 7.2 Onda de impulso atmosférico recortada en la cola. Tomado de [1].

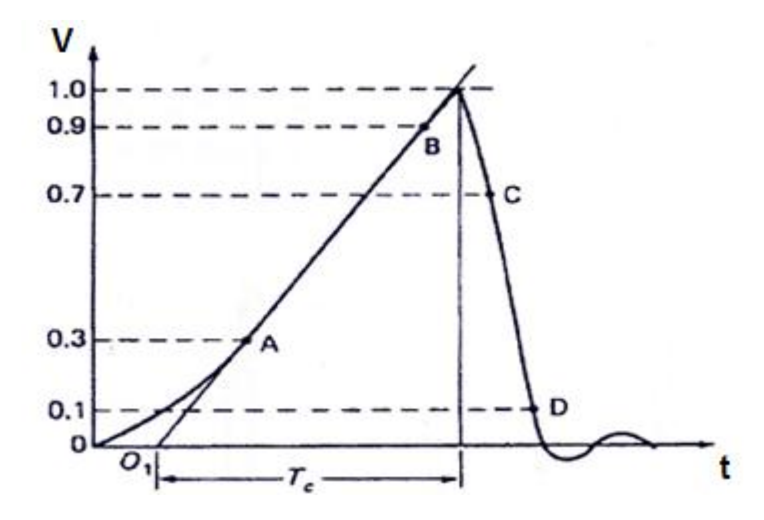


Figura 7.3 Onda de impulso atmosférico recortada en el frente. Tomado [1].

El colapso se puede producir en el frente, en la cresta o bien en la cola. La duración hasta el corte es un parámetro convencional definido como el lapso entre el origen convencional O_1 y el instante de corte.

El impulso atmosférico normalizado es un impulso pleno con una duración de frente T_1 de 1,2 μs y una duración hasta la cola T_2 (amplitud al 50% de su valor de cresta) de 50 μs, denominado impulso 1,2/50.

No es fácil lograr las duraciones del impulso, Las especificaciones dadas por la IEC, permiten unos porcentajes de tolerancia para ensayos mostrados a continuación:

$$T_1 = 1,2 \pm 30\% \ [\mu s]$$

$$T_2 = 50 \pm 30\% \ [\mu s]$$

Se deben distinguir estas diferencias de los errores de medición que son las diferencias entre los valores realmente medidos y los valores verdaderos.

El impulso atmosférico recortado normalizado es un impulso recortado mediante un explosor (gap) exterior en su cola, entre 2 y 5 μs. Otros tiempos de corte pueden ser especificados para algunos casos especiales.

Ya que los impulsos de tensión son referenciados como de T_1/T_2, entonces la onda 1,2/50 es la aceptada actualmente como la onda impulso atmosférico con sus respectivas tolerancias.

Impulso maniobra

La onda de sobretensión cuyo tiempo de frente convencional es superior a 10 microsegundos se clasifica como sobretensión de maniobra.

Las características de una onda de maniobra implican algunos parámetros adicionales que se indican a continuación y que se ilustran en la fig. 7.4.

El tiempo de pico T_1 es el lapso entre el origen real y el instante en que la tensión alcanza el valor de cresta.

El tiempo hasta la cola T_2 es el lapso entre el origen real y el instante en que la tensión alcanza la mitad de su valor de cresta.

El tiempo por encima de 90% T_d es el lapso durante el cual la tensión excede 90% de su valor de cresta.

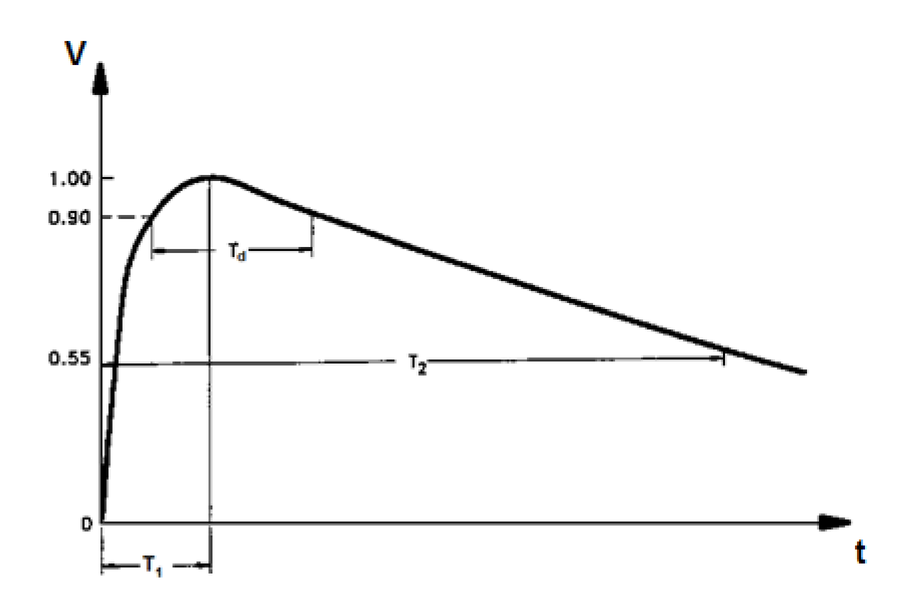


Figura 7.4 Onda de impulso maniobra. Tomado de [1].

El impulso de maniobra normalizado denominado impulso 250/2500 es un impulso con una duración hasta la cresta de 250 μs y una duración hasta la cola de 2500 μs.

También en este ensayo es difícil lograr las duraciones del impulso, aceptándose las siguientes tolerancias entres los valores especificados y los valores realmente medidos:

$$T_1 = 250 \pm 20\% \ [\mu s]$$

$$T_2 = 2500 \pm 60\% \ [\mu s]$$

En ciertos casos, por ejemplo con objetos de baja impedancia, puede resultar difícil ajustar la forma del impulso para quedar dentro de los valores de tolerancia recomendados. En estos casos, otras tolerancias u otras formas de onda pueden ser especificadas para un equipo en particular.

La tensión de descarga disruptiva para grandes intervalos de aire puede influenciar la duración del valor de cresta y de la cola del impulso de maniobra.

Ya que los impulsos de tensión son referenciados como de T_1/T_2, entonces la onda 250/2500 es la aceptada actualmente como la onda impulso maniobra con sus respectivas tolerancias.

Generación de impulsos

Los ensayos de aislamiento a impulso normalizado que simulan las solicitaciones con frente brusco de origen atmosférico o de maniobra, se realizan con generadores de impulso, GI DE TENSIÓN.

El esquema básico de los generadores de impulso es generalmente el de Marx (multietapa) que muestra la fig. 7.5 y consiste en grupos de capacitores que se CARGAN en PARALELO por medio de rectificadores de alta tensión, a través de resistencias de carga. La DESCARGA de los capacitores se realiza a través de explosores de esferas de un circuito SERIE que incluye resistencias amortiguadoras de las oscilaciones.

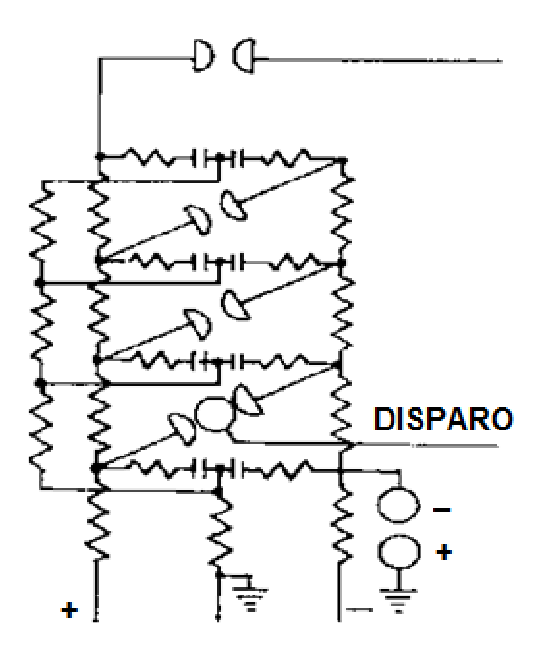


Figura 7.5 Esquema general de un generador de impulsos de tensión tipo Marx. Tomado [1].

La carga de los capacitores y en consecuencia la tensión total del generador puede variarse regulando la tensión del rectificador. La polaridad de la tensión se cambia invirtiendo las conexiones de los capacitores al rectificador. Los explosores de esferas controlan el disparo del equipo y la que corresponde al lado de tierra de la primera etapa, contiene un dispositivo llamado trigratrón, el cual se encarga de iniciar la descarga de los condensadores. Iniciada la descarga, ésta se propaga a todos los explosores de la cadena.

Para leer la tensión de descarga se utiliza normalmente un divisor de tensión de tipo resistivo o un divisor de tensión de tipo capacitivo.

Los elementos conectados juntos para la prueba a impulso atmosférico conforman el circuito equivalente mostrado en la fig. 7.6.

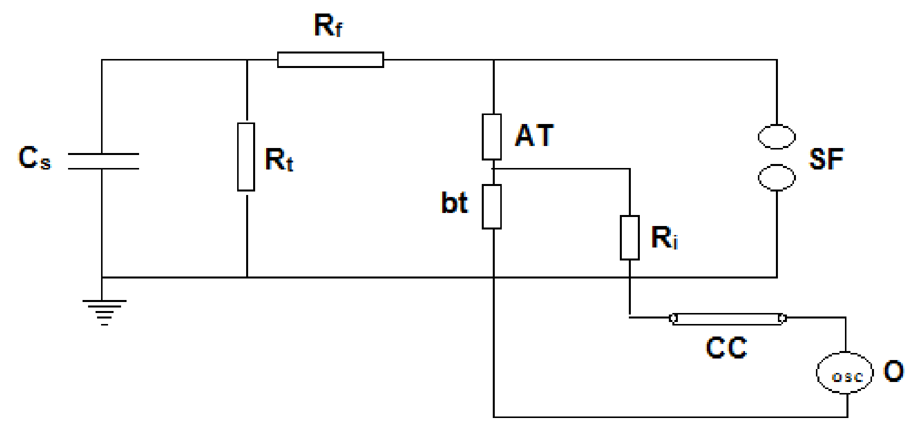


Figura 7.6 Circuito para impulso atmosférico. Onda completa y recortada.

Los elementos conectados juntos para la prueba a impulso maniobra conforman el circuito equivalente mostrado en la fig. 7.7.

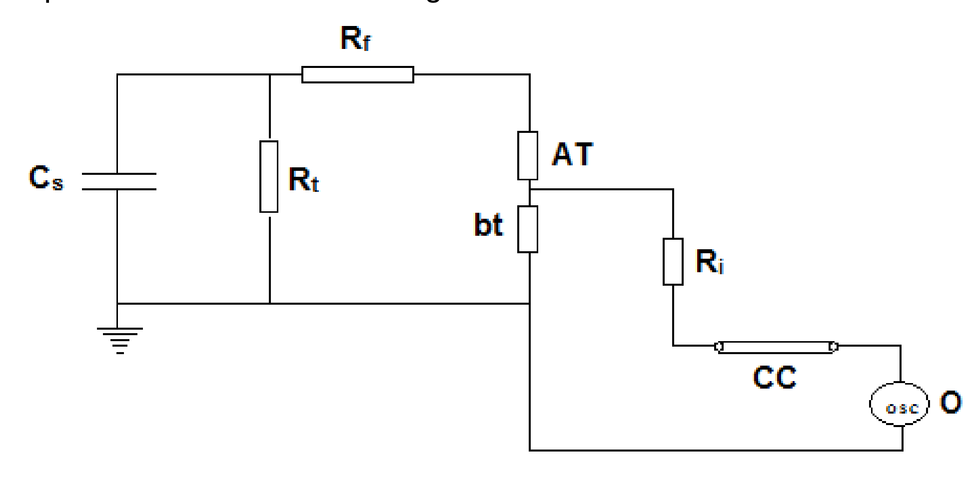


Figura 7.7 Circuito para impulso de maniobra. Onda completa.

Donde:
C_S - grupo de capacitores del generador de impulsos de tensión
R_t - resistencia en paralelo de la cola
R_f - resistencia serie del frente
AT - capacitancia de alta tensión
bt - capacitancia de bajo tensión
R_i - resistencia del terminal de acople
CC - cable coaxial
O - osciloscopio
SF – espinterómetro

La forma del impulso depende de los parámetros del circuito y del objeto en prueba. En particular el tiempo de frente T_1 depende sustancialmente de la capacidad del objeto en prueba y de la resistencia en serie. El tiempo de cola T_2 está determinado por la capacidad del generador y de la resistencia en paralelo.

En la tabla 7.1 se muestran las principales características del GI del LAT de la UIS

Tabla 7.1 Características técnicas del GI Haefely tipo S-serie SGS 800/20. [4]

Máxima energía por etapa [kJ]		2,5
Capacitancia por etapa, C_s [nF]		500 ± 5 %
Rata máxima de repetición del impulso por minuto		2
Inductancia por etapa [μH]		≈ 2,5
Tensión máxima por etapa [kV] (0 ≤ h ≤ 1000 m)		100
Eficiencia para	IA	86 – 94 %
Cs/Cb > 10	IM	83 – 90 %
Resistencias R_P [Ω]	IA	138 (AZULES)
	IM	9,6 kΩ (AMARILLAS)
Resistencias R_s [Ω]	IA	20 (ROJAS)
	IM	20 (ROJAS)
Resistencias R_{se} [Ω]	IA	610
	IM	75 kΩ (60, 36)
Entrehierro [mm]		41
Impulso del trigger para la unidad de carga [V]		+200
Altura [m]		3,27

En la tabla 7.2 se muestran las principales características del divisor capacitivo con que se cuenta en el LAT de la UIS

Tabla 7.2 Características del divisor capacitivo marca Haefely, tipo CS 1 000. [4]

Tensión Máxima de medida, [kV]	IA (+)	1 000
	IM (+)	900
Relación		720,5 : 1
Capacitancia unidad AT, [pF]		652,3
Capacitancia unidad bT, [nF]		468,0
Terminal de acople, [Ω]		75
Resistencia de amortiguamiento, [Ω]		100 ± 10%
Tiempo de respuesta, [ns]		< 100
Altura, [m]		3,5

El valor de las resistencias tanto de frente R_f como de cola R_t para los diferentes tipos de impulso se obtiene de acuerdo a:

- Para impulso atmosférico

$$R_f = n\, R_{ROJAS} + R_{ESTERILLA} \quad (7.1)$$

$$R_t = n\, R_{AZULES} \quad (7.2)$$

- Para impulso maniobra

$$R_f = n\, R_{ROJAS} + R_{ESTERILLA} \quad (7.3)$$

$$R_t = n\, R_{AMARILLAS} \quad (7.4)$$

La capacitancia del equipo se encuentra teniendo en cuenta que los condensadores se descargan en serie, por lo tanto:

$$C = \frac{C_s}{n} \quad (7.5)$$

Donde n corresponde al número de etapas del GI.

3. Procedimiento:

3.1 Efectuar los ajustes necesarios para generar una onda de tipo impulso atmosférico (IA) según el montaje mostrado en la fig. 7.3.

3.2 Registrar las condiciones del laboratorio y tomar los datos necesarios en la hoja de registro de datos

3.3 Aplicar un impulso de polaridad positiva y otro de polaridad negativa a la misma tensión de carga por etapa.

3.4 Efectuar los ajustes necesarios para generar una onda de tipo impulso atmosférico recortada (IAR). El tiempo de recorte se fijará durante la práctica.

3.5 Aplicar un impulso de polaridad positiva a la misma tensión de carga por etapa fijada en el numeral 3.

3.6 Efectuar los ajustes necesarios para generar una onda de tipo impulso maniobra (IM) según el montaje mostrado en la fig. 7.4.

3.7 Tomar los datos necesarios en la hoja de registro de datos.

3.8 Aplicar un impulso de polaridad positiva o negativa a la misma tensión de carga por etapa fijada en el numeral 3.

3.9 Obtener los tiempos de frente y de cola para todas las formas de onda registradas y comparar con los valores teóricos**.**

3.10 Comparar el tiempo de recorte obtenido con el tiempo de recorte ajustado y obtener el error relativo.

3.11 Utilizar las fórmulas reducidas (cálculos de consola) y completas (análisis de Laplace) para hallar los tiempos de frente y de cola de las ondas de tipo impulso atmosférico y de maniobra. Hallar la eficiencia teórica y la real para cada tipo de onda.

3.12 Hacer el análisis sobre la distancia de apertura de las esferas de recorte (espinterómetro). Hallar el factor de seguridad a las condiciones estándar.

REGISTRO DE DATOS

PRUEBA PARA IMPULSO ATMOSFÉRICO – ONDA DE TENSIÓN COMPLETA Y RECORTADA. Ver figura 7.6	
Generador de impulso	
No. de etapas	
C_s [nF]	
R_t [Ω]	
R_{fi} [Ω]	
$R_{f\ ext}$ [Ω]	
Tensión de carga [kV]	
Tiempo de carga [s]	
Osciloscopio	
Tipo	
Atenuación	
Escala vertical [V/div]	
Forma de onda normalizada	
Tiempo de frente [µs]	
Tolerancia %	
Tiempo de cola [µs]	
Tolerancia %	
Forma de onda medida	
Polaridad	
Tiempo de frente [ms]	
Oscilograma	
Tiempo de cola [ms]	
Oscilograma	
Divisor de tensión	
Tipo	
Relación	
Unidad de AT [pF]	
Unidad de bt [nF]	
Terminal de acople	
Resistencia [Ω]	
Espinterómetro	
Diámetro [cm]	
Separación [mm]	
Tiempo de recorte[µs]	Ajustado:
	Medido:
Oscilograma	

PRUEBA PARA IMPULSO DE MANIOBRA – ONDA DE TENSIÓN COMPLETA. Ver figura 7.7	
Generador de impulso	
No. de etapas	
C_s [nF]	
R_t [kΩ]	
R_{fi} [Ω]	
$R_{f\ ext}$ [kΩ]	
Tensión de carga [kV]	
Tiempo de carga [s]	
Osciloscopio	
Tipo	
Atenuación	
Escala vertical [V/div]	
Escala horizontal [µs/div]	
Forma de onda normalizada	
Tiempo de frente [µs]	
Tolerancia %	
Tiempo de cola [µs]	
Tolerancia %	
Forma de onda medida	
Polaridad	
Tiempo de frente [µs]	
Oscilograma	
Tiempo de cola [µs]	
Oscilograma	
Divisor de tensión	
Tipo	
Relación	
Unidad de AT [pF]	
Unidad de bt [nF]	
Terminal de acople	
Resistencia [Ω]	

4. Bibliografía:

1. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

2. CASTELLANOS ZAMBRANO, Henry Dalid. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta-punta y punta-placa. Tesis de Maestría en Potencia Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Mecánicas, 2002.

3. IEEE Std. 4-1995. IEEE Standart Techniques for High-Voltage Testin. New York. 1995.

4. HAEFELY. “Impulse voltage test system. Serie 5”. Manual de usuario. 1990.

5. VILA, Raúl Omar. Generador de impulsos de 4-etapas en serie. Manuscrito. 1992.

6. HILEMAN, A. R. Insulation coordination for power systems. Taylor and Francis Group, 1999.

PRÁCTICA No. 8

DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE CHISPA, $V_{50\%}$.

1. Objetivos:

1.1 Obtener la tensión de chispa $V_{50\%}$ en un aislamiento externo, siguiendo una de las metodologías establecidas en la Norma IEEE Std. 4-1995 (IEC 60.2) para una onda tipo impulso.

1.2 Conocer y aplicar la metodología para el tratamiento de la información obtenida durante el ensayo con el fin de calcular el $V_{50\%}$ de acuerdo con la norma y con las fórmulas de Dixon y Mood.

2. Marco teórico:

La tensión de chispa $V_{50\%}$, es la tensión de carga disruptiva que tiene una probabilidad del 50% de producir una descarga a un aislamiento, es decir que la mitad de las tensiones aplicadas a este nivel terminarán en ruptura. A este valor también se le conoce como tensión crítica de flameo (CFO).

El cálculo de la tensión de chispa de un aislamiento, es posible realizarlo utilizando procedimientos experimentales, dentro de los que se destacan:

- Clase 1: Pruebas de niveles múltiples
- Clase 2: Pruebas de up and down
- Clase 3: Pruebas de descargas sucesivas

A continuación se describe el procedimiento para realizar ensayos siguiendo la metodología para aislamientos clase 2 (pruebas up and down).

El método up and down se utiliza en los ensayos que se efectúan con ondas tipo impulse atmosférico e impulsos maniobra. Permite una estimación bastante confiable de la tensión de chispa, cuando esta se comporta como una población normalmente distribuida. Con este método también es posible conocer una estimación para la desviación estándar.

Para implementar el método, inicialmente se estima una tensión de chispa ($V_K = V^*_{50\%}$) para la distancia de separación entre electrodos a probar o para el aislamiento que se esté investigando. Al aplicar un impulso de tensión con este valor, si no se produce chispa, entonces se incrementa el valor de tensión inicial

en un valor $\boldsymbol{\Delta V}$, que según las recomendaciones de la IEC para impulsos atmosféricos, puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\Delta \boldsymbol{V} = \boldsymbol{0,03}(\boldsymbol{V}^{*}_{\boldsymbol{50\%}}) \qquad (\boldsymbol{8.1})$$

Se aplica el nuevo impulso de tensión de valor $\boldsymbol{V^{*}_{50\%}+\Delta V}$, si no se presenta chispa, se incrementa nuevamente la tensión anterior en un $\boldsymbol{\Delta V}$. Si se presenta chispa debe disminuirse en el mismo valor $\boldsymbol{\Delta V}$, y así sucesivamente hasta completar el numero de impulsos requeridos.

Se considera el primer impulso efectivo a la primera chispa. En este procedimiento para la evaluación de la tensión de chispa, el número n de impulsos aplicados generalmente no debe ser inferior a 20, y solamente en casos extremos, cuando sea necesario una mejor precisión de la $\boldsymbol{V_{50\%}}$, n debería ser igual a 60 aplicaciones de tensión.

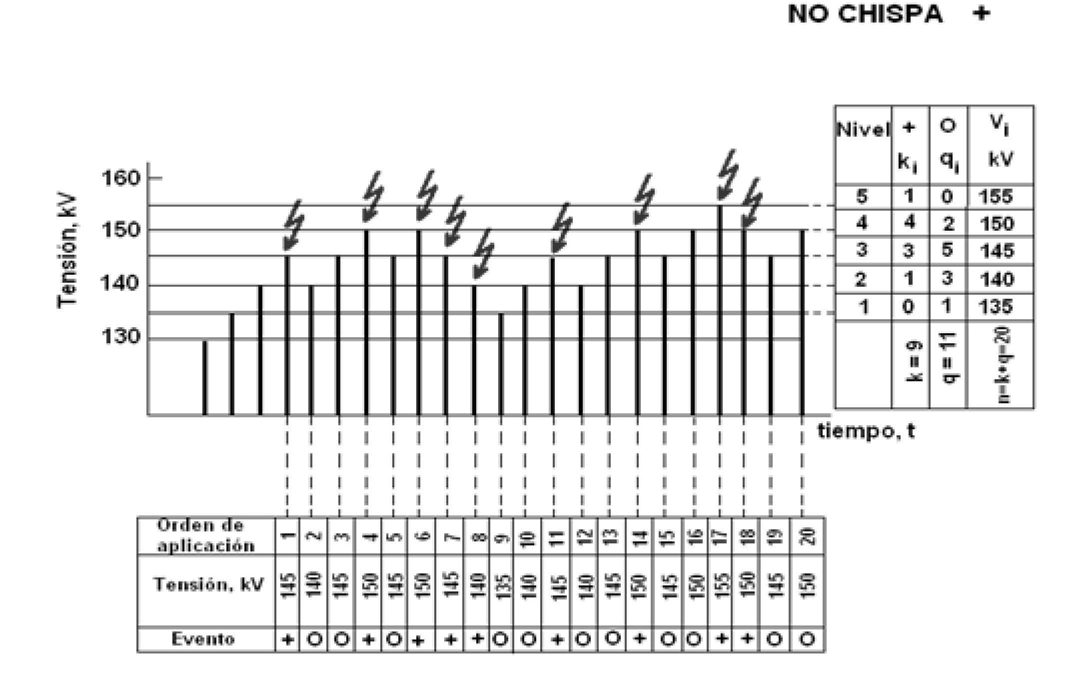


Figura 8.1 Representación esquemática del método up and down. Tomado de [2].

El tiempo entre las aplicaciones de los impulsos, debe ser suficiente para que cada una de ellas sea independiente, es decir que se tengan las mismas condiciones al aplicar la tensión, generalmente 1 minuto.

Es importante consignar todos los datos presentes en el momento de la prueba, tanto de las condiciones atmosféricas como de los datos durante la prueba, en una tabla u hoja de protocolo correctamente diligenciada para facilitar el tratamiento estadístico.

Una vez realizado el ensayo, se utilizan tratamientos estadísticos para determinar la tensión de chispa.

A. Método de la norma IEC 60.2

La tensión de chispa según la norma IEC 60.2 ó la IEEE Std. 4 de 1995, se calcula como el producto de la tensión de cada nivel por el número de eventos (flámeos mas soportes), sobre el número total de aplicaciones, es decir:

$$\boldsymbol{V_{50\%}} = \frac{\sum \boldsymbol{k_i V_i}}{\boldsymbol{n}} \qquad (\mathbf{8.2})$$

Donde:

V_i - nivel de tensión aplicada [kV]

k_i - número de pruebas individuales realizadas en el mismo nivel de tensión

n - número total de pruebas validas (20 impulsos mínimo según la norma)

B. Método de Dixon y Mood

Dixon y Mood, idearon una metodología para calcular la tensión de chispa V50%, que consiste en tomar el número de eventos de menor ocurrencia, ya sea chispas o soportes, y con base en esta elección hacer el cálculo de la tensión de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{V_{50\%}} = \frac{\sum \boldsymbol{n_v V_v}}{\sum \boldsymbol{n_v}} \pm \frac{\Delta \boldsymbol{V}}{\mathbf{2}} \qquad (\mathbf{8.3})$$

Donde:

n_v - es el número menos frecuente, entre los eventos soportes o chispas, en cada nivel de tensión.

V_v - nivel de tensión aplicada [kV]

$$\Delta V = \frac{V_f - V_i}{m - 1} \qquad (8.4)$$

Donde:
V_f - nivel de tensión aplicada más alto [kV]
V_i - nivel de tensión aplicada más bajo [kV]
m - número de niveles de tensión aplicada

El signo ±, es positivo, si utilizan los soportes, y negativo, si utilizan las chispas.

Una ventaja de este método es la de conocer simultáneamente un estimativo de la tensión de chispa y la desviación estándar, siempre y cuando los datos estén normalmente distribuidos. La desviación estándar estimada se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{1,62}{\Delta V}\left[\frac{\sum n_v {V_v}^2 - \frac{(\sum n_v V_v)^2}{\sum n_v}}{\sum n_v}\right] + 0,047\Delta V \qquad (8.5)$$

3. **Procedimiento**:

3.1 Tomar los datos de temperatura, presión y humedad relativa en el laboratorio y consignarlos en la hoja de registro de datos.

3.2 Tomar los datos referentes al objeto de prueba a utilizar durante el ensayo.

3.3 Verificar el montaje del generador de impulsos siguiendo las recomendaciones de la práctica No 7.

3.4 Fijar la tensión inicial de acuerdo con los datos suministrados por el profesor e iniciar el proceso para determinar el $V_{50\%}$ utilizando el método “Up and down” (se deben aplicar un mínimo de 20 impulsos “efectivos” para impulso atmosférico). Registrar estos valores y eventos en la hoja de datos obtenidos.

3.5 Calcular el $V_{50\%}$ de acuerdo con la norma IEC ó IEEE y las fórmulas de Dixon y Mood. Registrar los valores empleados y los cálculos realizados en la hoja de cálculos.

3.6 Hallar los valores normalizados para la $V_{50\%}$ y compararlos con los actuales (a condiciones de laboratorio).

REGISTRO DE DATOS

CONDICIONES ATMOSFÉRICAS			
Normalizadas		**Laboratorio**	
Temperatura	20°C	**Temperatura**	
Presión	760 [mm Hg]	**Presión**	
Humedad	11 [g/m^3]	**Humedad**	Relativa:
			Absoluta:

FACTORES DE CORRECCIÓN			
Impulso	**Polaridad**	k_1	k_2
Atmosférico			
Maniobra			
Corriente Alterna			

k_1 – factor de corrección por densidad del aire

k_2 – factor de corrección por humedad

DATOS OBTENIDOS MUESTRA No:___________

Objeto de prueba:______________________ Tipo de impulso: IA ( ) IM ( ) Fecha: _____________________

Tensión de Carga Por etapa [kV]	Tensión medida en BT [V]	Tiempo de Flameo en [microsegundos μs]																		
		Flameo (+)										No Flameo (0)								

Realizó:	Revisó:

HOJA DE CÁLCULOS

Objeto prueba:				
Tipo de impulso:				
Muestra No.:				
Tensión aplicada: kV	Número de flámeos (+)	Número de no flámeos (O)	Número total	V*N
			$\sum$N=	$\sum$(V*N) =
$V_{50\%}$, no corregido		Norma IEC 60.2		
		Método de Dixon y Mood		
$(V_{50\%})_o$, corregido		Norma IEC 60.2		
		Método de Dixon y Mood		

4. Bibliografía:

1. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

2. CASTELLANOS ZAMBRANO, Henry Dalid. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta-punta y punta-placa. Tesis de Maestría en Potencia Eléctrica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Mecánicas, 2002.

3. IEEE Std. 4-1995. IEEE Standart Techniques for High-Voltage Testin. New York. 1995.

4. H. W. Moss, W. P. Peregrinus. Statistical Techniques for High Voltage Engineering.

5. HILEMAN, A. R. Insulation coordination for power systems. Taylor and Francis Group, 1999.

ENSAYOS SOBRE DISPOSITIVOS CONTRA SOBRETENSIONES (DPS)
Parte I: Pruebas en Corriente Alterna, 60 Hz.

1. Objetivos:

1.1 Observar y evaluar el comportamiento de los DPS de SiC (carburo de silicio) y ZnO (óxido de zinc), tipo distribución, cuando se someten a sobretensiones de tipo corriente alterna 60 Hz.

1.2 Obtener los registros de tensión y de corriente.

2. Marco teórico:

Los DPS son aparatos destinados a proteger el material eléctrico contra las sobretensiones transitorias elevadas (originadas por descargas atmosféricas, maniobra, ferroresonancia, etc.), a limitar su duración y, frecuentemente, a limitar la amplitud de la corriente subsiguiente.

Estos dispositivos comenzaron con formas de cuernos entre los cuales bajo una sobretensión se iniciaba una descarga, evolucionaron al DPS de SiC (carburo de silicio) con resistencias no lineales en serie a un explosor, y luego surgió la tecnología con óxidos metálicos, dentro de los cuales se popularizó el uso del óxido de zinc (ZnO).

Los DPS de SiC (recortador) utilizan válvulas de resistencias no lineales de carburo de silicio en serie con una estructura de explosores (a través de los cuales se descarga la sobretensión), las válvulas limitan y cortan la corriente. La utilización de los explosores es necesaria debido a que el carburo de silicio tiene un pequeño coeficiente de no linealidad, y siempre estaría conduciendo. La conexión en serie de los explosores disminuye la tensión aplicada a los bloques, impide el paso de corrientes de fuga y corta el paso de la corriente que se produce después de una descarga.

Los DPS ZnO (limitador) contienen pastillas de oxido metálico que funcionan como varistores presentando una alta impedancia en condiciones normales de funcionamiento de la red, teniendo unas descargas en funcionamiento normal del orden de miliamperios. Debido a su curva de funcionamiento altamente no lineal, la aparición de una sobretensión en la red implica una disminución exponencial de la resistencia que presenta la autoválvula a la circulación de la corriente, derivando

la sobrecorriente a tierra a través de ella e impidiendo que la tensión en la red supere el nivel de aislamiento nominal del equipo.

Los DPS habitualmente están conectados entre los conductores de una red eléctrica y tierra, aunque a veces pueden ser conectados entre los bornes de los arrollamientos de aparatos o entre conductores.

Algunas de las características eléctricas de los DPS son:

Tensión nominal o de servicio (V): valor específico máximo de la tensión eficaz a frecuencia industrial admisible entre sus bornes para la cual está previsto que el DPS funcione correctamente.

Frecuencia nominal: frecuencia de la red para la cual está previsto el DPS.

Corriente de descarga (i_d): onda de corriente que fluye por el DPS como consecuencia del cebado de los explosores en serie.

Corriente subsiguiente o de drenaje (i_s): corriente aportada por la red y que fluye por el DPS después del paso de la corriente de descarga.

Tensión de descarga (V_a): valor pico de la tensión que aparece entre bornes desde que se presenta la sobretensión hasta cuando aparece la corriente de descarga.
Tensión residual (V_R): tensión que aparece entre bornes de un DPS durante el paso de la corriente de descarga.

Tensión de cebado a frecuencia industrial (aplica sólo a DPS de SiC): valor de la tensión a frecuencia industrial medida en valor de cresta y dividida por $\sqrt{2}$, que aplicada entre los bornes de un DPS, provoca el cebado de todos los explosores en serie

Tensión máxima de operación continua (MCOV) (aplica sólo a DPS de ZnO): es la máxima tensión que puede ser aplicada entre bornes del DPS de forma indefinida sin que haya un aumento tanto en las pérdidas como en la temperatura del dispositivo.

En la fig 9.1 se pueden observar las principales características de funcionamiento de un DPS de carburo de silicio.

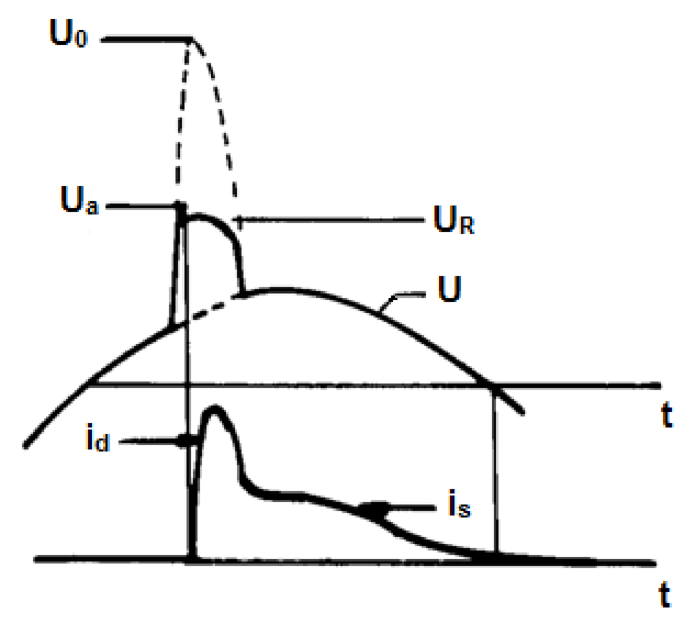


Figura 9.1 Tensiones y corrientes presentes en el instante de descarga de un DPS de SiC.

3. Procedimiento:

3.1 Realizar el montaje de la fig. 9.2 conectando el DPS de SiC directamente a tierra.

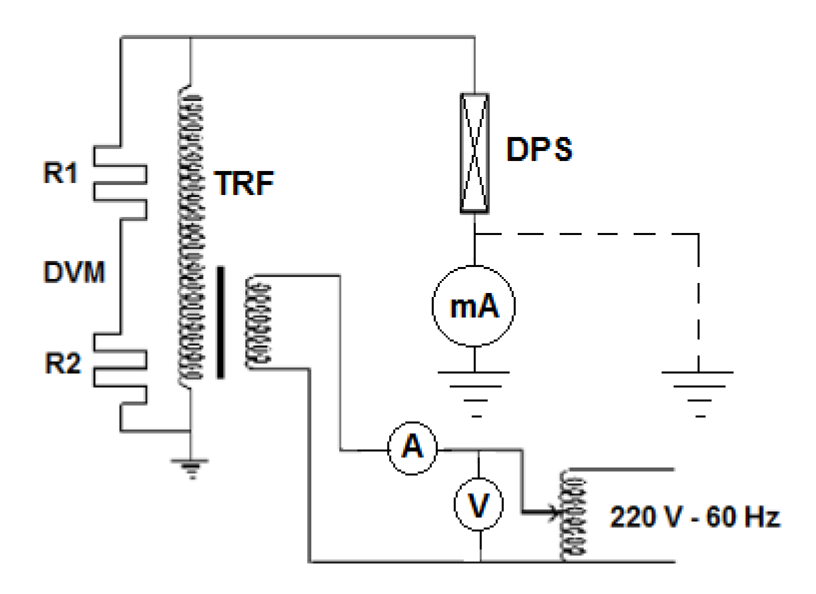


Figura 9.2 Montaje para ensayos con corriente alterna.

3.2 Aplicar tensión al pararrayos de SiC con una rata rápida de 3 [kV/s] y registrar los valores de la tensión de cebado y la tensión de reposición en la hoja de datos obtenidos, tabla 9.1.

3.3 Utilizando el montaje de la fig. 9.2 obtener la corriente de drenaje con diferentes sobretensiones para el DPS de SiC y para el de ZnO. Registrar estos valores en la hoja de datos obtenidos, tabla 9.2.

3.4 Presentar una gráfica de Tensión en por unidad contra Corriente de drenaje en valor pico para los dos tipos de DPS. Los valores en por unidad se refieren para el caso del DPS de SiC, a la tensión nominal, y para el DPS de ZnO, al valor de MCOV.

3.5 Analizar los resultados.

4. <u>Equipo utilizado:</u>

- Divisor de tensión óhmico:
  R_1 = 300 MΩ ± 10%
  R_2 = 350 kΩ ± 2%
  Relación calibrada = 1055/1

- Osciloscopio (OSC):
  Tipo digital
  Marca = Fluke

- Transformador elevador de corriente alterna (TR):
  Marca = Foster
  Tipo = Tanque
  Tensión primaria = 0…..500 V
  Tensión secundaria = 0…..300 kV
  Potencia = 20 kVA
  Corriente primaria máxima = 40 A
  Corriente secundaria máxima = 67 mA

- Amperímetro de hierro móvil – Escala 0 – 48 A (A):
  Conectado a través transformador de corriente de relación nominal 8/1.
  Se encuentra en la consola de mando del transformador.

- Tester digital (mA):
  Marca = UNIVOLT.
  Utilizar en las escalas de 0 – 200 μA, 0 – 2 mA (C.A.)

- DPS de SiC:
  Tipo válvula.
  Recortador de onda 10 kA y 30 kV.

- DPS de ZnO:
  Tipo varistor sin válvula.
  Limitador de tensión 10 kA, 30 kV y MCOV de 24,4 kV.

DATOS OBTENIDOS
Tabla 9.1

No.	Tensión aplicada [kV]	Tensión aplicada [V]	V_{CEBADO} [V]	$V_{REPOSICIÓN}$ [V]	Observaciones
1					
2					
3					
4					
5					
6					

$$V_{CEBADO} = \frac{\sum_{i=1}^{5} V_i}{5} \text{ , [kV]}$$

$$V_{REPOSICIÓN} = \frac{\sum_{i=1}^{5} V_i}{5} \text{ , [kV]}$$

Tabla 9.2

No.	Tensión aplicada [kV]	Tensión aplicada [V]	Corriente de drenaje [A]		Observaciones
			DPS SiC	DPS ZnO	
1					
2					
3					
4					
5					
6					

5. <u>Bibliografía:</u>

1. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

2. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION. Descargadores de sobretensiones de resistencia variable con explosores para redes de corriente alterna. NTC 2166. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.

3. ANSI/IEEE Std. C62.11-2006. Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits. New York. 2006.

4. TORRES, H. Protección contra rayos. Icontec, Bogotá. 2007.

ENSAYOS EN DISPOSITIVOS CONTRA SOBRETENSIONES (DPS)
Parte II: Pruebas de Impulso.

1. Objetivos:

1.1 Observar y evaluar el comportamiento de los DPS de SiC (carburo de silicio) y ZnO (óxido de zinc), tipo distribución, cuando se someten a sobretensiones de tipo impulso atmosférico.

1.2 Obtener los registros de tensión y de corriente.

2. Marco teórico:

Para medir las corrientes de impulso en las pruebas de alta tensión en los laboratorios se utilizan los shunt, que están constituidos por unas cargas resistivas a través de las cuales se deriva una corriente eléctrica y consisten en cilindros metálicos con bridas de acoplamiento y conectores coaxiales de medición.

Generalmente la resistencia del shunt es conocida con precisión y es utilizada para determinar la intensidad de corriente eléctrica que fluye a través de esta carga mediante la medición de la diferencia de potencial a través de ella.

En el laboratorio de Alta Tensión se utilizan shunts tipo sleeve marca HAEFELY, los cuales permiten estimar la corriente de un impulso que alcance una tensión hasta de un valor de 500 V. El valor óhmico del shunt puede ser cambiado fácilmente abriendo el alojamiento y reemplazando el elemento activo, los resistores-sleeves tienen baja inductancia, son intercambiables y están montados dentro de un cilindro de acero inoxidable.



Figura 10.1 Shunt tipo sleeve SH H. Tomado de [5].

Tabla 10.1 Caracterización del shunt tipo sleeve. [5]

Sleeve Shunts SH H			
Tipo	**SH H 2**	**SH H 5**	**SH H 10**
Caída de tensión nominal U_n	500 V	500 V	500 V
Caída de tensión Máx. U_{max}	1000 V	1000 V	1000 V
Corriente pico nominal I_n	250 A	100 A	50 A
Corriente pico Máx. I_{max}	500 A	200 A	100A
Resistencia R	2 Ω	5 Ω	10 Ω
Precisión de la Resistencia	±5%	±5%	±5%
Tiempo de respuesta parcial T_α	10 ns	10 ns	10 ns
Frecuencia de repetición a U_n / I_n	1 s	1 s	1 s
Frecuencia de repetición a U_{max} / I_{max}	4 s	4 s	4 s
Peso	1,5 kg		
Dimensiones	H 115 mm, A 70 mm, L255 mm		

Precisión en la medición de la resistencia <±1%

3. Procedimiento:

3.1 Analizar junto con el profesor, las especificaciones de los DPS según catálogos. Registrar los datos de placa de los DPS bajo ensayo.

3.2 Tomar los datos del montaje de acuerdo con la fig. 10.1.

3.3 Proceder a aplicar los impulsos de acuerdo con la siguiente rutina:

a) Obtener el valor prospectivo de la tensión. Obtener tiempo de frente y de cola de la onda. Esto se efectúa sin conectar el DPS.

b) Conectar el DPS y aplicar tantos impulsos cuantos sean necesarios para registrar las siguientes características:

- Tensión de descarga en kV y su tiempo de descarga en µs.
- Onda de corriente. Valor máximo en A y tiempo de cresta en µs.
- Tiempo de caída al 50% de su valor máximo en µs.
- Para el DPS de ZnO. Valor de la tensión de sellado en kV y tiempo a tensión de "sellado" en µs.

3.4 Cada grupo trabajará con una tensión igual a 3,33 veces la tensión de cebado mínima según observación inicial sobre el DPS de SiC. Impulsos de polaridad positiva o negativa.

3.5 Indicar los resultados de acuerdo con el análisis de los registros de las ondas en la hoja de datos obtenidos.

3.6 Indicar en forma tabulada los valores indicados en el procedimiento.

3.7 Efectuar un análisis comparativo de los resultados de acuerdo con el tipo de DPS.

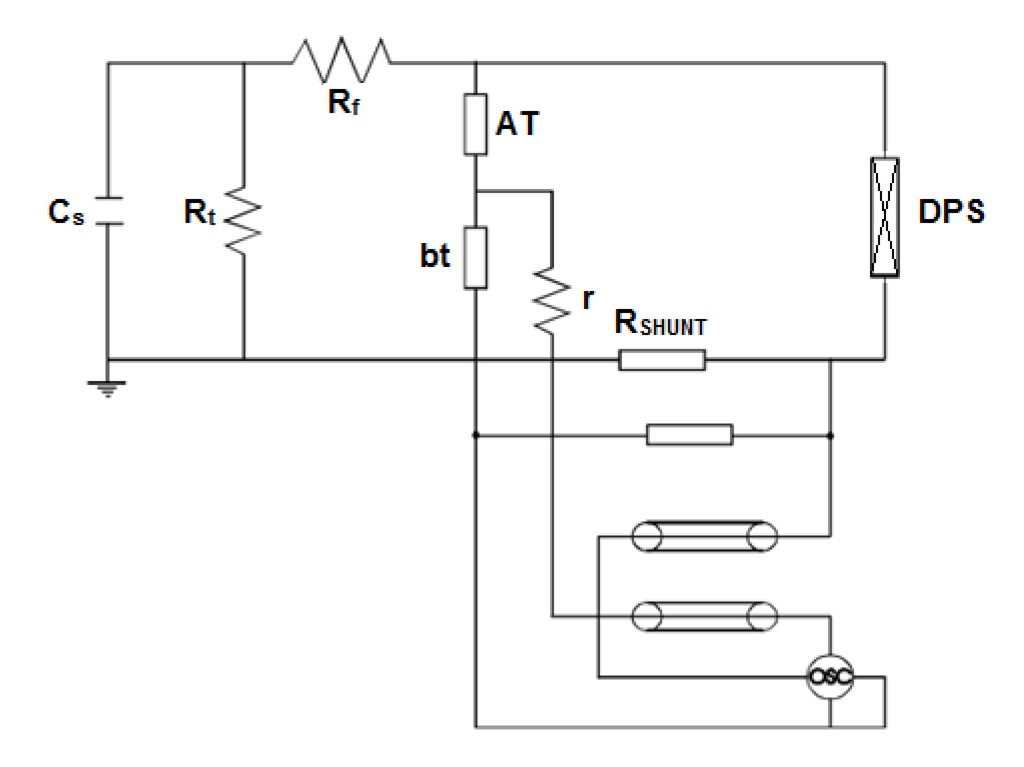


Figura 10.1 Montaje para ensayos con impulso atmosférico.

4. Equipo utilizado:

- Divisor de tensión:
  Tipo = Capacitivo amortiguado
  Unidad de AT = 652,3 ρF
  Unidad de bt = 468,0 nF
  Relación = 720,5/1

- Osciloscopio (OSC):
  Tipo digital
  Marca = Fluke

- Generador de impulsos de tensión
  Tipo S-serie SGS 800/20
  (Ver características en la práctica 7)

- Resistencia Shunt:
  Tipo coaxial
  V nominal = 500 V

- DPS de SiC:
  Tipo válvula.
  Recortador de onda 10 kA y 30 kV.

- DPS de ZnO:
  Tipo varistor sin válvula.
  Limitador de tensión 10 kA, 30 kV y MCOV de 24,4 kV.

DATOS OBTENIDOS

Ensayo No.		**V** DESCARGA	**Tiempo** DESCARGA	**Corriente** DESCARGA **[A]**		**Tiempo [μs]**		**Observaciones**
		Máxima		**Máx**	**Medio**	**Máx**	**Medio**	
SiC								
ZnO								

5. Bibliografía:

1. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en la técnica de la alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1991.

2. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION. Descargadores de sobretensiones de resistencia variable con explosores para redes de corriente alterna. NTC 2166. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.

3. ANSI/IEEE Std. C62.11-2006. Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits. New York. 2006.

4. TORRES, H. Protección contra rayos. Icontec, Bogotá. 2007.

5. HAEFELY. “Impulse voltage test system. Serie 5”. Manual de usuario.. 1990.

PRUEBAS DE RIGIDEZ DIELÉCTRICA A ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL
Parte I: Guantes aislantes de energía eléctrica

1. Objetivos:

1.1 Probar las características eléctricas de los elementos de protección personal (p.e. guantes aislantes) utilizados por operarios de línea viva.

1.2 Manipular e identificar adecuadamente la muestra, equipos, montaje, condiciones de seguridad, ejecución de las pruebas y criterios de alta conformidad necesarios para realizar ensayos de tensión aplicada y disruptiva a guantes aislantes basados en la norma ASTM D-120.

2. Marco teórico:

La utilización y dependencia tanto industrial como doméstica de la energía eléctrica, ha traído consigo la aparición de accidentes por contacto con elementos energizados o incendios, por esta razón se hizo necesaria la implementación de elementos de protección personal (dispositivos, accesorios y vestimentas) que debe emplear el trabajador para protegerse contra posibles lesiones.

El equipo de protección eléctrica personal adecuado consta de varios elementos tales como guantes aislantes, mangas dieléctricas, mantas aislantes, botas aislantes, cascos aislantes, etc.

Los guantes aislantes son utilizados para protección personal; por lo tanto, cuando se autoriza su uso, debe ser empleado un margen de seguridad entre la máxima tensión a la que pueden ser usados y la tensión de ensayo a la cual han sido probados.

Según la norma ASTM D-120, la relación entre la tensión de prueba y la máxima tensión a la cual los guantes deben ser usados se muestra en la tabla 11.1.

Tabla 11.1 Relación entre la tensión de prueba y la máxima tensión de uso de guantes aislantes. [3]

Clase del guante	Tensión de prueba en AC [V_{rms}]	Máxima tensión de uso en AC [V_{rms}]	Tensión de prueba en DC [V_{rms}]	Máxima tensión de uso en DC [V_{rms}]
00	2500	500	10000	750
0	5000	1000	20000	1500
1	10000	7500	40000	11250
2	20000	17000	50000	25500
3	30000	26500	60000	39750
4	40000	36000	70000	54000

Los guantes que se encuentran bajo las anteriores especificaciones deben ser designados como Tipo I ó Tipo II; Clase 00, Clase 0, Clase 1, Clase 2, Clase 3 ó Clase 4. Los guantes Tipo I son NO RESISTENTES al ozono mientras que los guantes Tipo II son RESISTENTES al ozono.

La designación de las clases para los guantes aislantes está basada en las propiedades eléctricas mostradas en las tablas 11.2 y 11.3.

Tabla 11.2 Corriente máxima permisible en miliamperes para los distintos valores de tensión en AC. [2]

Clase del guante	Tensión de prueba en [V_{rms}]	Tensión mínima de falla [V_{rms}]	Máxima corriente de prueba [mA] a 60 Hz			
			11" (280m)	14" (360mm)	16" (410mm)	18" (460mm)
00	2500	4000	8	12	-	-
0	5000	6000	8	12	14	16
1	10000	20000	-	14	16	18
2	20000	30000	-	16	18	20
3	30000	40000	-	18	20	22
4	40000	50000	-	-	22	24

Tabla 11.3 Valores de tensión mínima permisibles en DC. [2]

Clase del guante	Tensión de prueba promedio [V]	Tensión mínima de falla promedio [V]
00	10000	13000
0	20000	35000
1	40000	60000
2	50000	70000
3	60000	80000
4	70000	90000

3. Procedimiento:

3.1 Identificar y registrar cada uno de los aspectos que se indican en la hoja de registro de datos para ensayo a guantes aislantes.

3.2 Los guantes aislantes deben ser lavados con jabón suave o un detergente suave no blanqueador. Después se deben juagar cuidadosamente para remover todo el jabón o detergente y luego secarlos bajo sombra.

3.3 Se deben revisar los guantes protectores, ya que estos pueden contener elementos o partículas incrustadas que pueden dañar el guante aislante; también porque sustancias que se adhieren a este como aceite y grasa pueden ocasionar desgaste y cambios en el material del guante aislante o incendios en el momento de la operación.

3.4 Tanto los guantes aislantes como los guantes protectores deben ser chequeados por perforaciones sometiéndolos a un proceso de inflado ya sea con la máquina, o en su defecto enrollando la manga del guante para que el atrape el aire en su interior. Si el guante presenta perforaciones (salidas de aire) no se debe someter a ensayos eléctricos, y se debe desechar.

Revisar que los guantes no tengan rayones, incrustaciones, pinchazos, ramificaciones, degradaciones de color o espesor y cualquier otra imperfección en la superficie del mismo, teniendo especial cuidado en las zonas de mayor uso como lo son la palma, la punta de los dedos y la unión entre dedos.

3.5 Confirmar la clasificación del guante, su tipo, clase, color, tamaño y fabricante; revisando la información que debe traer el guante en el borde superior del mismo y consignándola en la hoja de registro de datos para guantes aislantes.

3.6 Ubicar el tanque de pruebas sobre la mesa aislada, llenar el tanque con agua limpia y a temperatura ambiente hasta un nivel tal que permita la inmersión del guante.

3.7 Proceder a verter el agua dentro del guante (teniendo en cuenta que no se creen burbujas de aire) y llenar hasta el nivel establecido en la tabla 11.4 conforme a los datos del guante. Situar el guante dentro del tanque de pruebas previamente llenado con agua limpia.

Tabla 11.4 Distancia vertical entre el nivel de agua y el borde del guante. [2]

Clase del guante	Distancia mínima requerida [mm]
0	38
1	38
2	64
3	89
4	127

3.8 Realizar el montaje de la fig. 11.1. Introducir dentro del guante el electrodo positivo sumergiéndolo en el agua que contiene el guante, teniendo en cuenta que el electrodo NO toca el guante; seguidamente conectar la fase al electrodo positivo.

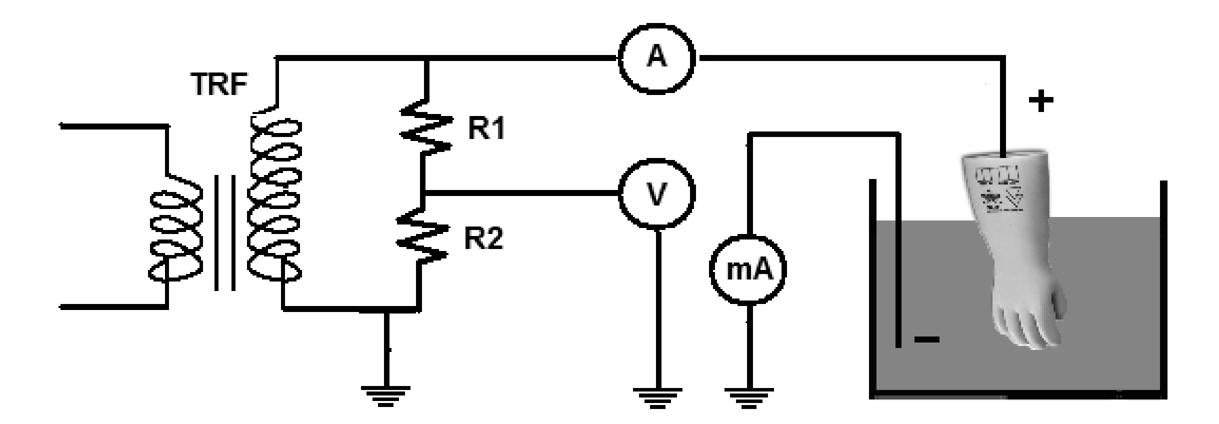


Figura 11.1 Montaje para la prueba a guantes aislantes. Tomado de [2].

Realizar la conexión correspondiente del electrodo negativo, el cual está fuera del guante y en contacto con el agua externa. Colocar en serie entre el electrodo y la tierra del laboratorio un miliamperímetro

3.9 Comprobar que el nivel del agua del tanque coincida con el nivel de agua dentro del guante y que no existan burbujas de aire por dentro y fuera sobre la superficie del guante. La parte del guante que queda fuera del agua debe estar completamente seca, caso contrario se debe esperar a que se seque.

3.10 Definir la tensión de prueba para el guante conforme a la clasificación del mismo (ver tabla 11.1) y anotarla en la hoja de registro de datos para ensayos a guantes aislantes.

3.11 Anotar en la hoja de registro de datos la temperatura y humedad del recinto en el cual se realizará el ensayo.

3.12 Energizar el equipo y aumentar la tensión con una velocidad aproximada de 1kV por segundo hasta alcanzar la tensión de prueba. Con el cronómetro en ceros, activarlo y mantener la tensión de prueba de 1 a 3 minutos. Supervisar que el valor de la corriente de fuga mostrado por el miliamperímetro no supere los valores establecidos según la tabla 11.2.

3.13 Luego de comprobar que el circuito esta desenergizado, consignar en la hoja de registro de datos la temperatura final y humedad final del recinto

3.14 Ingresar a la zona de pruebas y desmontar el objeto de prueba. Una vez desmontado del circuito, el guante se debe secar e inspeccionar físicamente en busca de nuevos imperfectos.

3.15 Por último se realiza el análisis de resultados de la siguiente manera:

a) En caso que el guante presente nuevas deformaciones en su superficie, se debe colocar en la hoja de registro de datos NO APROBÓ LA PRUEBA y su causa.

b) En caso que el guante se encuentre en perfecto estado se procede como sigue:

- Si el guante SOPORTÓ la tensión de prueba durante el tiempo de prueba SIN FALLAR y SIN SUPERAR LA CORRIENTE DE FUGA se da como criterio la ACEPTACIÓN del mismo y se anota en la hoja de registro de datos.

- Si el guante NO SOPORTÓ LA TENSIÓN DE PRUEBA durante el tiempo de prueba, presentó falla o superó la corriente de fuga permitida, el criterio final de la prueba es: NO APROBÓ LA PRUEBA y se anota en la hoja de registro de datos la NO ACEPTACIÓN y la CAUSA DE RECHAZO, igualmente se debe marcar sobre el guante el punto de falla.

4. Equipo utilizado:

El equipo a utilizar en estos ensayos es el siguiente:

- Transformador elevador de corriente alterna (TR):
  Marca = Foster
  Tipo = Tanque
  Tensión primaria = 0.....500 V
  Tensión secundaria = 0.....300 kV

Potencia = 20 kVA
Corriente primaria máxima = 40 A
Corriente secundaria máxima = 67 mA

- Divisor de tensión óhmico:
  R_1 = 300 MΩ ± 10%
  R_2 = 350 kΩ ± 2%
  Relación calibrada = 1055/1

- Osciloscopio (OSC):
  Tipo digital
  Marca = Fluke

- Miliamperímetro (mA):

- Accesorios:
  - Tanque de pruebas (construido en porcelana, sus dimensiones son 70 cm de alto y 50 cm x 50 cm).
  - Mesa aislada (aislada del piso mediante 4 aisladores).
  - Soporte de madera.
  - Ganchos plásticos.
  - Tramos de cadena plástica.
  - Alambre aislado.

REGISTRO DE DATOS

<table>
<tr><td colspan="3">Normas aplicadas: ASTM D-120</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Descripción de la muestra</td><td>Tipo:</td><td>Clase:</td></tr>
<tr><td>Color:</td><td>Talla:</td></tr>
<tr><td>Longitud:</td><td>Marca:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Inspección de las superficies del guante:
Guante derecho: APROBÓ _____ NO APROBÓ _____
Guante izquierdo: APROBÓ _____ NO APROBÓ _____</td></tr>
<tr><td colspan="3">Observaciones del guante antes de la prueba:</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Características ambientales</td><td colspan="2">h.s.n.m.:</td></tr>
<tr><td>Temperatura inicial:</td><td>Humedad inicial:</td></tr>
<tr><td>Temperatura final:</td><td>Humedad final:</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Características eléctricas</td><td colspan="2">Tensión de prueba: kV</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tiempo de prueba: m</td></tr>
<tr><td colspan="2">Corriente de fuga: mA</td></tr>
<tr><td colspan="2">Distancia del borde del guante al nivel del agua: cm</td></tr>
<tr><td colspan="3">Resultado de la prueba:
Guante derecho: APROBÓ _____ NO APROBÓ _____
Guante izquierdo: APROBÓ _____ NO APROBÓ _____</td></tr>
<tr><td colspan="3">Inspección de las superficies del guante:
SE APROBARON _____ NO SE APROBARON _____</td></tr>
<tr><td colspan="3">Observaciones:</td></tr>
</table>

5. Bibliografía:

1. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION. Higiene y Seguridad. Guantes Aislantes de la Electricidad. NTC 2219. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.

2. VARGAS, E. Pruebas de tensión de ruptura dieléctrica en equipos de protección personal para operadores de línea viva. UIS. Tesis Pregrado. 2009.

3. ASTM D-120-02a. Standard Specification for Rubber Insulating Gloves. New York. 2006.

4. ASTM F-496. Standard Specification for in-service Care of Insulating Gloves. New York. 2006.

5. ASTM F-696. Standard Specification for Protectors for Rubber Insulating Gloves and Mittens. New York. 2006.

6. ASTM F-1236. Standard Guide for Visual Inspection of Electrical Protective Rubber Products. New York. 2006.

PRÁCTICA No. 12

PRUEBAS DE RIGIDEZ DIELÉCTRICA A ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL
Parte II: Cascos aislantes de electricidad

1. Objetivos:

1.1 Probar las características eléctricas de los elementos de protección personal (cascos aislantes) utilizados por operarios de línea viva.

1.2 Manipular e identificar adecuadamente la muestra, equipos, montaje, condiciones de seguridad, ejecución de las pruebas y criterios de alta conformidad necesarios para realizar ensayos de tensión aplicada y disruptiva a cascos aislantes basados en la norma NTC 1523.

2. Marco teórico:

El casco de seguridad es un elemento de protección personal que protege la cabeza contra impactos de partículas volátiles, riesgos eléctricos, salpicaduras de sustancias químicas, materiales ígneos, calor radiante y efectos de las llamas; el material con el cual se fabrica el casco es normalmente plástico a alta presión.

Los cascos en general se clasifican dependiendo del tipo de protección o riesgo para el cual fueron fabricados. Se habla de cascos de seguridad industrial tipo 1 ó tipo 2 de acuerdo a su diseño, y clase A, B, C ó D de acuerdo con el riesgo.

Los cascos tipo 1 están compuestos fundamentalmente por el casquete combinado con visera y arnés, los tipo 2 traen casquete combinado con ala y arnés. De manera más precisa el casco consta de las siguientes partes: casquete, arnés, suspensión, tafilete y barbuquejo.

En cuanto a la clase, los cascos clase D ofrecen protección limitada contra riesgos eléctricos, mientras que el clase B es un casco que ofrece protección en trabajos con riesgo eléctrico en alta tensión.

Es de vital importancia tener en cuenta las recomendaciones asociadas a los cuidados con el casco, usos, resistencia al impacto, resistencia a la penetración, resistencia a la absorción e inflamabilidad y resistencia dieléctrica.

En las tablas 12.1 y 12.2 se observa la clasificación de los cascos según la norma ANSI Z-89-1.

Tabla 12.1 Clasificación de los cascos según el tipo de riesgo. [3]

Clase	Clasificación por tipo de riesgo	Resistencia de aislamiento
Clase A	Acción de impactos Penetración de agua Penetración de fuego Salpicaduras ígneas Salpicaduras químicas Riesgo eléctrico limitado	2 000 V (AC)
Clase B	Riesgos eléctricos MT Acción de impactos Penetración de agua Penetración de fuego Salpicaduras ígneas Salpicaduras químicas	5 000 V (AC) 10 000 V (AC) 15 000 V (AC) 20 000 V (AC) 25 000 V (AC)
Clase C	Acción de impactos Penetración de agua Penetración de fuego Salpicaduras ígneas Salpicaduras químicas NO protege riesgo eléctrico	Casco metálico
Clase D	Penetración de fuego Acción de impactos Riesgo eléctrico limitado	2 000 V (AC)

Tabla 12.2 Clasificación de los cascos clase B. [3]

Clase	Protección contra
B1	Impacto Penetración Absorción Inflamabilidad Dieléctrico hasta 2 200 V
B2	Impacto Penetración Absorción Inflamabilidad Dieléctrico hasta 15 000 V
B3	Impacto Penetración Absorción Inflamabilidad Dieléctrico hasta 25 000 V

3. Procedimiento:

3.1 Identificar y registrar cada uno de los aspectos que se indican en la hoja de registro de datos para ensayo a cascos aislantes.

3.2 Verificar visualmente el tipo, clase, color, marca y demás características técnicas del casco y anotarlas en la hoja de registro de datos.

3.3 Retirar todos los accesorios del casco y dejar únicamente el casquete. Revisar que el casco no tenga perforaciones, incrustaciones, pinchazos, cortaduras y/o cualquier otra imperfección en la superficie del mismo y apuntar los resultados de la inspección en la hoja de registro de datos.

3.4 Llenar el tanque con agua hasta un nivel tal que permita la inmersión del casco (mínimo 30 litros) y seguidamente acomodar el casquete dentro del tanque sujetándolo de forma que no se mueva y quede ubicado simétricamente.

3.5 Llenar el casquete de la solución electrolítica NaCl, 6 gramos por litro, y verificar que el nivel del agua por fuera del casco coincide con el nivel del electrolito dentro del casco.

3.6 Verificar que la distancia vertical es de 12 mm, medidos desde el borde del casquete o del orificio del borde del casquete hasta el nivel del agua o electrolito. La parte del casquete que NO está introducida en el líquido debe estar seca, caso contrario secarla o esperar a que se seque.

3.7 Realizar el montaje de la fig. 12.1. Introducir el electrodo positivo dentro de la solución electrolítica que está dentro del casquete. Conectar la fase al electrodo positivo.

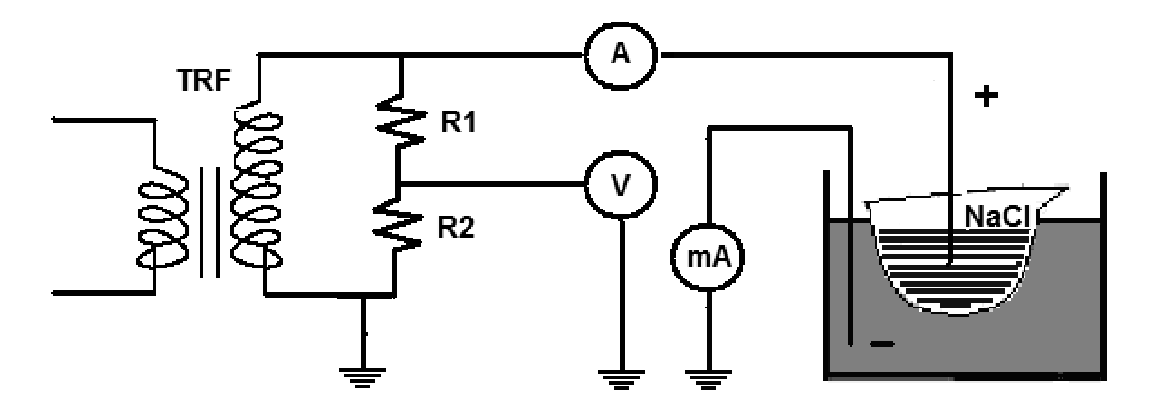


Figura 12.1 Montaje para la prueba a cascos aislantes. Tomado de [2].

Introducir el electrodo negativo dentro del tanque, de tal manera que haga contacto con el agua y después conectarlo en serie a través de un miliamperímetro con la tierra del laboratorio.

3.8 Anotar en la hoja de registro de datos la hora, temperatura y humedad del recinto en el cual se realizará el ensayo.

3.9 Definir la tensión de prueba conforme a la clasificación del casco y anotarla en la hoja de registro de datos.

Para cascos clase A y D se aplica la tensión en forma escalonada desde 0 V (cero volts) con incrementos de 200 V, y cada tensión se mantiene durante 1 minuto hasta alcanzar 2 200 V; esta ultima tensión se mantiene durante 3 minutos, paso seguido se observa la medida del amperímetro y se anota en la hoja de registro de datos.

Para los cascos clase B se utiliza el aparato de ensayo de alta tensión, se aplica tensión en forma escalonada desde 0 V (cero volts) con incrementos de 2 000 V, manteniendo cada nivel de tensión durante 1 minuto, cuando se alcancen 20 kV esta ultima tensión se mantiene durante 3 minutos; luego se observa la lectura del miliamperímetro. Pasados los 3 minutos a la tensión de 20 kV, se sigue aumentando la tensión hasta alcanzar 30 kV.

Tabla 12.3. Tiempos de exposición a la tensión para cascos clase B. [2]

Tensión aplicada	Tiempo de aplicación [minutos]
0 V	
2000 V	1
4000 V	1
6000 V	1
8000 V	1
8000 V	1
10000 V	1
12000 V	1
14000 V	1
16000 V	1
18000 V	1
20000 V	3
30000 V	-

3.10 Con el cronómetro en ceros energizar el equipo y aplicar lentamente la tensión conforme a lo definido en el numeral anterior. Supervisar y anotar en la hoja de registro de datos el valor de la corriente de fuga medida por el

miliamperímetro, así como la tensión máxima que alcanzo la prueba o a la cual falló el elemento. Al final de la prueba, reducir gradualmente la tensión aplicada por lo menos hasta la mitad de su valor y luego desenergizar totalmente el circuito.

3.11 Pasar a la zona de ensayos y apuntar en la hoja de registro de datos la hora, temperatura final y humedad final del recinto.

3.12 Por último se realiza el análisis de resultados de la siguiente manera:

c) En caso que el casco presente nuevos daños en su superficie, se debe colocar en la hoja de registro de datos NO APROBÓ LA PRUEBA y su causa.

d) En caso que el casco se encuentre en perfecto estado se procede como sigue:

- Si el casco SOPORTÓ la tensión de prueba durante el tiempo de prueba SIN FALLAR, se da como criterio la ACEPTACIÓN del mismo y se anota en la hoja de registro de datos.

- Si el casco NO SOPORTÓ LA TENSIÓN DE PRUEBA durante el tiempo de prueba, y presentó falla, el criterio final de la prueba es: NO APROBÓ LA PRUEBA y se anota en la hoja de registro de datos la NO ACEPTACIÓN y la CAUSA DE RECHAZO, igualmente se debe marcar sobre el casco el punto de falla.

4. <u>Equipo utilizado:</u>

El equipo a utilizar en estos ensayos es el siguiente:

- Transformador elevador de corriente alterna (TR):
  Marca = Foster
  Tipo = Tanque
  Tensión primaria = 0.....500 V
  Tensión secundaria = 0.....300 kV
  Potencia = 20 kVA
  Corriente primaria máxima = 40 A
  Corriente secundaria máxima = 67 mA

- Divisor de tensión óhmico:
  R_1 = 300 MΩ ± 10%
  R_2 = 350 kΩ ± 2%
  Relación calibrada = 1055/1

- Osciloscopio (OSC):
  Tipo digital
  Marca = Fluke

- Miliamperímetro (mA).

- Accesorios:
  - Tanque de pruebas (construido en porcelana, sus dimensiones son 70 cm de alto y 50 cm x 50 cm).
  - Mesa aislada (aislada del piso mediante 4 aisladores).
  - Soporte de madera.
  - Ganchos plásticos.
  - Tramos de cadena plástica y alambre aislado.

REGISTRO DE DATOS

<table>
<tr><td colspan="6" align="center">Normas aplicadas: NTC 1523</td></tr>
<tr><td colspan="3">Hora inicial:</td><td colspan="3">Hora final:</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Descripción de la muestra</td><td colspan="2">Tipo:</td><td colspan="2">Clase:</td></tr>
<tr><td colspan="2">Color:</td><td colspan="2">Marca:</td></tr>
<tr><td colspan="6">Tipo de prueba:

AC ______ DC ______</td></tr>
<tr><td colspan="6">Inspección de la superficie del casco:

APROBÓ ______ NO APROBÓ ______</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Características ambientales</td><td colspan="5">h.s.n.m.:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Temperatura inicial:</td><td colspan="2">Humedad inicial:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Temperatura final:</td><td colspan="2">Humedad final:</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">Características eléctricas</td><td colspan="4">Tensión máxima de prueba: kV</td></tr>
<tr><td colspan="4">Tiempo de prueba: m</td></tr>
<tr><td colspan="4">Corriente de fuga: mA</td></tr>
<tr><td colspan="6">Resultado de la prueba:

SE APROBÓ ______ NO SE APROBÓ ______</td></tr>
<tr><td colspan="6">Observaciones:

</td></tr>
</table>

5. **Bibliografía:**

1. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACION Y CERTIFICACION. Cascos de seguridad Industrial. NTC 1523. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000.

2. VARGAS, E. Pruebas de tensión de ruptura dieléctrica en equipos de protección personal para operadores de línea viva. UIS. Tesis Pregrado. 2009.

3. ANSI Z89.1. Safety Requeriments for industrial head Protection. New York. 1985.

ANEXO B

Plano del circuito de control del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander